

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO  
EN LA TEORÍA DE JUEGOS EN UN SISTEMA MULTICELULAR LIMITADO POR  
INTERFERENCIA CON PORTADORA ÚNICA**



**María Alejandra Cárdenas Tejada  
José Manuel Chapid Hurtado**

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL  
Popayán, Octubre de 2015**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO  
EN LA TEORÍA DE JUEGOS EN UN SISTEMA MULTICELULAR LIMITADO POR  
INTERFERENCIA CON PORTADORA ÚNICA**



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

**María Alejandra Cárdenas Tejada  
José Manuel Chapid Hurtado**

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL  
Popayán, Octubre de 2015**



## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPTULO 1 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE UN SISTEMA MOVIL CELULAR.....	3
1.1. Sistemas Móviles Celulares.....	3
1.2. Sistema Móvil Multicelular.....	5
1.3. Interferencia.....	7
1.4. Gestión de Recursos Radio.....	9
1.4.1. Control de Potencia.....	9
CAPÍTULO 2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA TEORÍA DE JUEGOS.....	13
2.1. Generalidades .....	13
2.2. Juego Cooperativo.....	14
2.3. Juego No Cooperativo.....	14
2.3.1. Equilibrio de Nash.....	16
2.3.2. Equilibrio de Satisfacción.....	17
2.4. Aprendizaje Reforzado .....	18
CAPÍTULO 3 APLICACIÓN DE UN MODELO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN UN SISTEMA MULTICELULAR.....	21
3.1. Definición del Sistema Multicelular.....	21
3.2. Modelo de Control de Potencia Basado en Teoría de juegos.....	22
3.2.1. Definición del Juego.....	23
3.2.2. Descripción del Algoritmo.....	24
3.3. Modelo de Control Ideal de Potencia.....	26
3.4. Diagrama de Flujo General del Sistema.....	29
CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
4.1. Desarrollo de la Simulación.....	31
4.1.1. Limitaciones Físicas del Sistema.....	31
4.1.2. Desarrollo metodológico.....	32
4.1.2.1. Selección de la Herramienta de Simulación.....	32
4.1.2.2. Codificación del Sistema Multicelular.....	33
4.1.2.3. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación.....	33
4.1.2.4. Definición de las Características Técnicas de los Escenarios de Simulación.....	35



4.2. Resultados y Análisis.....	36
4.2.1. Escenario 1: 1Km.....	38
4.2.2. Escenario 2: 0.5Km.....	56
4.3. Resumen de Resultados.....	73
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	75
5.1. Conclusiones.....	75
5.2. Trabajos futuros.....	76
APÉNDICE A.....	77
APÉNDICE B.....	89
APÉNDICE C.....	91
REFERENCIAS.....	97



## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.1. Enlaces de Comunicación entre una BS y el UE.....	4
Figura 1.2. FDD y TDD.....	5
Figura 1.3. Sistema de comunicaciones multicelular.....	6
Figura 1.4. Interferencia de Canal Adyacente. ....	8
Figura 1.5. Interferencia Co-Canal. ....	8
Figura 1.6. Efecto Cerca–Lejos.....	10
Figura 2.1. Árbol de decisión.....	15
Figura 2.2. Comportamiento del Aprendizaje Reforzado.....	18
Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema. ....	22
Figura 3.2. Diagrama de flujo del algoritmo de PC basado en GT.....	25
Figura 3.3. Diagrama de flujo de IPC.....	28
Figura 3.4. Diagrama de flujo general del sistema.. ....	30
Figura 4.1. Escenario de simulación 1.....	34
Figura 4.2. Escenario de simulación 2.....	34
Figura 4.3. Escenario de simulación 1.....	38
Figura 4.4. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz. ....	39
Figura 4.5. Resultados de un UE a 545m de la MBS.....	40
Figura 4.6. Resultados de un UE no conectado.....	41
Figura 4.7. Variación de la probabilidad de potencia.....	41
Figura 4.8. Variación de la SINR de cinco UE.....	42
Figura 4.9. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz. ....	43
Figura 4.10. Probabilidad de degradación con GT e IPC. ....	43
Figura 4.11. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular. ....	44
Figura 4.12. Resultado obtenido con GT, escenario1 – datos.....	45
Figura 4.13. Resultado de un UE a 516m de la MBS.....	46
Figura 4.14. Resultado de un UE no conectado. ....	47
Figura 4.15. Variación de la probabilidad de potencia. ....	48
Figura 4.16. Variación de la SINR de cinco UE.....	49
Figura 4.17. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – datos.....	49
Figura 4.18. Probabilidad de degradación con GT e IPC. ....	50
Figura 4.19. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular. ....	51
Figura 4.20. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz y datos. ....	52
Figura 4.21. Variación de la probabilidad degradación.....	53
Figura 4.22. Variación de la probabilidad de potencia. ....	53
Figura 4.23. Variación de la SINR de cinco UE.....	54
Figura 4.24. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz y datos. ....	55
Figura 4.25. Probabilidad de degradación con GT e IPC. ....	55



Figura 4.26. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.....	56
Figura 4.27. Escenario de simulación 2.....	56
Figura 4.28. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz.....	57
Figura 4.29. Resultado de un UE a 98m de la MBS.....	59
Figura 4.30. Resultado de un UE a 415m de la MBS.....	59
Figura 4.31. Variación de la SINR de cinco UE.....	60
Figura 4.32. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz.....	60
Figura 4.33. Probabilidad de degradación con GT e IPC.....	61
Figura 4.34. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.....	61
Figura 4.35. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – datos.....	62
Figura 4.36. Variación de la probabilidad de potencia.....	63
Figura 4.37. Resultado de un UE no conectado.....	64
Figura 4.38. Variación de la SINR de cinco UE.....	65
Figura 4.39. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – datos.....	66
Figura 4.40. Probabilidad de degradación con GT e IPC.....	66
Figura 4.41. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.....	67
Figura 4.42. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz y datos.....	68
Figura 4.43. Variación de la probabilidad de potencia.....	69
Figura 4.44. Resultado de un UE a 38m de la MBS.....	70
Figura 4.45. Resultado de un UE a 478m de la MBS.....	70
Figura 4.46. Variación de la SINR de cinco UE.....	71
Figura 4.47. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz y datos.....	72
Figura 4.48. Probabilidad de degradación con GT e IPC.....	72
Figura 4.49. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.....	73
Figura A.1. Histograma, escenario 1 – voz.....	78
Figura A.2. Resultado obtenido, escenario 1 – voz.....	78
Figura A.3. Probabilidad de degradación, escenario 1 – voz.....	79
Figura A.4. Histograma, escenario 1 – datos.....	79
Figura A.5. Resultado obtenido, escenario 1 – datos.....	80
Figura A.6. Probabilidad de degradación, escenario 1 – datos.....	80
Figura A.7. Histograma, escenario 1 – voz y datos.....	81
Figura A.8. Resultado obtenido, escenario 1 – voz y datos.....	81
Figura A.9. Probabilidad de degradación, escenario 1 – voz y datos.....	82
Figura A.10. Histograma, escenario 2 – voz.....	83
Figura A.11. Resultado obtenido, escenario 2 – voz.....	84
Figura A.12. Probabilidad de degradación, escenario 2 – voz.....	84
Figura A.13. Histograma, escenario 2 – datos.....	85
Figura A.14. Resultado obtenido, escenario 2 – datos.....	85
Figura A.15. Probabilidad de degradación, escenario 2 – datos.....	86
Figura A.16. Histograma, escenario 2 – voz y datos.....	86



Figura A.17. Resultado obtenido, escenario 2 – voz y datos.....	87
Figura A.18. Probabilidad de degradación, escenario 2 – voz y datos.....	87
Figura C.1. Histograma, escenario 1 - voz.....	92
Figura C.2. Histograma, escenario 1 – caso 2. ....	92
Figura C.3. Histograma, escenario 1 – voz y datos.....	93
Figura C.4. Histograma, escenario 2 – voz.....	94
Figura C.5. Histograma, escenario 2 – datos. ....	94
Figura C.6. Histograma, escenario 2 – voz y datos.....	95

### Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tipos de celdas en un Sistema Multicelular. ....	6
Tabla 2. Escenarios y casos de simulación. ....	35
Tabla 3. Parámetros de los escenarios de simulación.....	35
Tabla 4. Comparación entre el algoritmo propuesto y la adaptación realizada. ....	37
Tabla 5. Convención utilizada en las pruebas.....	38
Tabla 6. Resultados obtenidos por celda, escenario 1 – voz.....	39
Tabla 7. Resultados obtenidos por celda, escenario 1 – datos. ....	45
Tabla 8. Resultados obtenidos por celda, escenario 1 – voz y datos.....	52
Tabla 9. Resultados obtenidos por celda, escenario 2 – voz.....	57
Tabla 10. Resultados obtenidos por celda, escenario 2 – datos.....	62
Tabla 11. Resultados obtenidos por celda, escenario 2 – voz y datos.....	68
Tabla 12. Resumen de Resultados. ....	73
Tabla 13. Variación del parámetro $x$ en los escenarios 1 y 2.....	89

### Lista de Acrónimos

<b>BR</b>	: <i>Best Response</i> , Mejor Respuesta.
<b>BS</b>	: <i>Base Station</i> , Estación Base.
<b>DL</b>	: <i>Downlink</i> , Enlace de Bajada.
<b>FDD</b>	: <i>Frequency Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Frecuencia.



<b>GoS</b>	: <i>Grade of Service</i> , Grado de Servicio.
<b>GT</b>	: <i>Game Theory</i> , Teoría de Juegos
<b>HO</b>	: <i>Hand Over</i> , Traspaso.
<b>IPC</b>	: <i>Ideal Power Control</i> , Control Ideal de Potencia.
<b>LR</b>	: <i>Learning Rate</i> , Tasa de Aprendizaje.
<b>MBS</b>	: <i>Micro Base Station</i> , Micro Estación Base.
<b>NE</b>	: <i>Nash Equilibrium</i> , Equilibrio de Nash.
<b>NFE</b>	: <i>Near-Far Effect</i> , Efecto Cerca-Lejos.
<b>NLOS</b>	: <i>Non Line Of Sight</i> , Sin Línea de Vista.
<b>QoS</b>	: <i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
<b>RAN</b>	: <i>Radio Access Network</i> , Red de Acceso Radio
<b>RL</b>	: <i>Reinforcement Learning</i> , Aprendizaje Reforzado.
<b>RRM</b>	: <i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
<b>SE</b>	: <i>Satisfaction Equilibrium</i> , Equilibrio de Satisfacción.
<b>SINR</b>	: <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia más Ruido.
<b>SIR</b>	: <i>Signal to Interference Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia.
<b>SNR</b>	: <i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
<b>TDD</b>	: <i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
<b>UE</b>	: <i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
<b>UL</b>	: <i>Uplink</i> , Enlace de Subida.
<b>WoLF</b>	: <i>Win or Learn Fast</i> , Ganar o Aprender Rápido.



# INTRODUCCIÓN

La aparición de nuevos servicios de telecomunicaciones que demandan un mayor ancho de banda y mejor calidad en el servicio ofrecido, junto con el incremento en la tasa de utilización de aplicaciones móviles que acceden a estos servicios, obliga a introducir técnicas que permitan administrar de manera eficiente el consumo de energía del dispositivo celular. Entre estas técnicas se encuentran las que controlan el consumo de potencia de cada componente del dispositivo, tales como: pantalla, procesador, teclado, módulos radio, etc., y otras técnicas encargadas de controlar las potencias de transmisión de las tecnologías inalámbricas con las que cuenta el dispositivo como Wifi, GSM, WCDMA, LTE, Bluetooth, NFC, entre otras.

En los sistemas de comunicaciones móviles es de gran importancia tener un consumo eficiente en la potencia de transmisión de las Estaciones Móviles y de las Estaciones Base, debido a que transmitir información con altas potencias genera niveles de interferencia que deterioran la Calidad del Servicio (QoS, *Quality of Service*).

Una de las herramientas ampliamente estudiada en el área de las telecomunicaciones es la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*), la cual pretende explorar nuevos métodos estadísticos y matemáticos que permitan realizar un estudio del comportamiento de un sistema de comunicaciones y de cada componente presente en el mismo. Actualmente, se han desarrollado trabajos con esta teoría donde se modelan situaciones en las que existe contienda por los recursos radio disponibles en el sistema, más específicamente en el Control de Potencia.

Este documento presenta la adaptación e implementación de un algoritmo de Control de Potencia (PC, *Power Control*) basado en la GT para las celdas que conforman un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única y se organiza de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Descripción Básica de un Sistemas Móvil Celular.
- Capítulo 2: Conceptos Básicos sobre la Teoría de Juegos.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

---

- Capítulo 3: Aplicación de un Modelo de Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos en un Sistema Multicelular.
- Capítulo 4: Simulación y Análisis de Resultados.
- Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos Futuros.



# CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE UN SISTEMA MÓVIL CELULAR

## 1.1. Sistemas Móviles Celulares

En la actualidad los sistemas móviles celulares son ampliamente explotados debido a las ventajas que ofrecen respecto a los sistemas cableados y a la posibilidad que tienen de cubrir áreas donde la población está muy dispersa y donde se presentan dificultades para acceder a ellas. Aunque estos sistemas tienen muchas ventajas, también presentan algunas desventajas, como: espectro finito, incertidumbre en la calidad del enlace, menor ancho de banda que en las redes cableadas, inestabilidad del enlace, problemas de ruido e interferencia, interrupción de la señal por posibles obstáculos en el camino, etc. Para reducir el impacto que tienen estos aspectos, se han establecido diferentes mecanismos de control que aseguran una mejor utilización de los recursos radio disponibles [1].

Los sistemas móviles celulares ofrecen servicios marítimos, aeronáuticos y terrestres, a través de los cuales se intercambia diferentes tipos de información, ya sea voz, audio, video o la combinación de estos, además de información de control y/o señalización. Para que el intercambio de información entre terminales móviles sea posible, es necesario que se encuentren dentro de una superficie geográfica conocida como “Zona de cobertura”. Este concepto define un área en la que se dispone de un servicio determinado al cual pueden acceder todos los terminales que se encuentren dentro de ella [2].

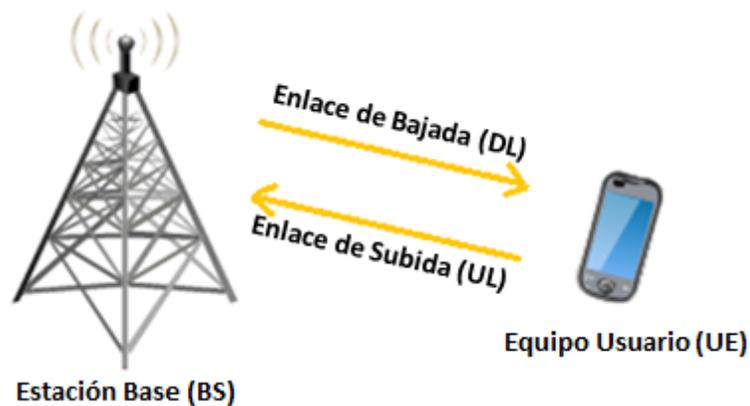
Un sistema móvil celular está conformado por dispositivos de control, monitoreo e interfaces radio, las cuales están constituidas por dos elementos principales:

- Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*)
- Estación Base (BS, *Base Station*)



El UE o también llamado móvil, es el dispositivo que el usuario utiliza para comunicarse con la BS o con otro UE en el momento que lo desee, siempre y cuando se encuentre dentro de una zona de cobertura. La BS está compuesta por dispositivos que controlan la transmisión y recepción de llamadas. Esta sirve como punto de acceso a redes de comunicación fijas y celulares, o para que a través de ella dos UE se comuniquen entre sí [2].

La comunicación entre la BS y el UE, se realiza a través de dos enlaces, como se aprecia en la figura 1.1. El enlace que se utiliza para transmitir información de la BS al UE se conoce como Enlace de Bajada (DL, *Downlink*), en esta comunicación se hacen necesarias las técnicas de multiplexación ya que la comunicación es de una BS a muchos UE; el enlace utilizado para transmitir información desde el UE a la BS se conoce como Enlace de Subida (UL, *Uplink*), en esta comunicación se emplean las técnicas de multiacceso debido a que muchos UE deben acceder a los recursos de una misma BS [1] [2].



**Figura 1.1.** Enlaces de Comunicación entre una BS y el UE. Por los autores.

En los sistemas móviles celulares para establecer el UL y el DL se utilizan dispositivos denominados duplexores, los cual permiten que la transmisión y recepción de información se realice de manera simultánea, empleando una portadora en el UL y otra en el DL, de modo que si la frecuencia de operación de ambas portadoras es diferente, se denomina Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*). En el caso que se emplee la misma frecuencia de operación para ambas portadoras, se llama Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Division Duplexing*) [3]. La figura 1.2 ilustra el concepto de duplexación en el tiempo y en frecuencia.



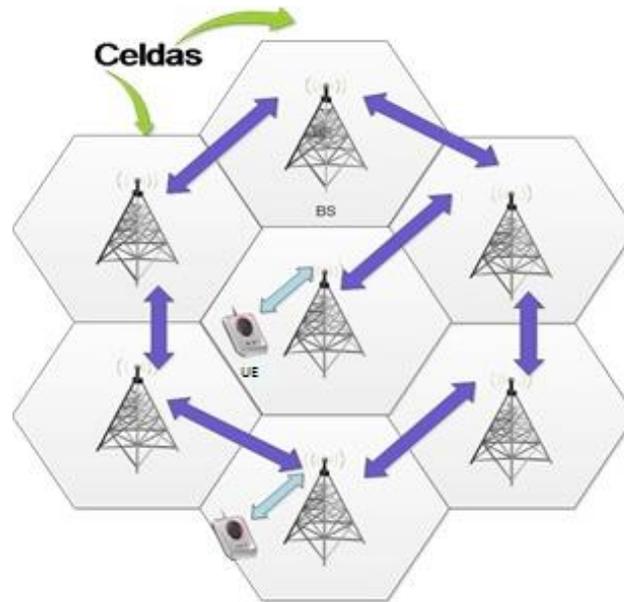
Figura 1.2. FDD y TDD. Adaptada de [3].

El tamaño del área a la que se le proporciona un servicio, está determinado por la zona de cobertura de una BS. Debido a la necesidad de brindar cobertura a un área geográfica mayor a la ofrecida por una sola BS, se introduce el concepto de sistema móvil multicelular.

## 1.2. Sistema Móvil Multicelular

Un sistema celular, se dice que es multicelular cuando posee más de una BS, de tal manera que cada una se ubique en el centro de un área geográfica denominada celda. Las celdas de un sistema multicelular se encuentran una a continuación de otra e interconectadas entre sí, como se observa en la figura 1.3.

La arquitectura general de un sistema móvil multicelular posee elementos que le permiten realizar monitoreo y control sobre sus interfaces radio, además de pasarelas mediante las cuales se accede a otro tipo de redes [4] [5].



**Figura 1.3.** Sistema de comunicaciones multicelular. Por los autores.

Existen diferentes tipos de celda las cuales se clasifican teniendo en cuenta el área de cobertura a servir y la densidad de usuarios en la misma [4]. Un sistema multicelular se considera homogéneo cuando las celdas que lo conforman son del mismo tipo y heterogéneo cuando las celdas tienen diferentes características entre sí [6]. La tabla 1 muestra los tipos de celdas según el área de cobertura.

**Tabla 1.** Tipos de celdas en un Sistema Multicelular [7] [8].

Tipo de celda	Cobertura	Potencia de transmisión de la BS	Cantidad máxima de UE soportados	Contexto de Uso
Macroceldas	1-30 Km	33 - 43 dBm	>250	Área rural, carreteras, interconexión de poblaciones cercanas.
Microceldas	0.2-2 Km	24 - 33 dBm	200	Ciudades con elevada densidad de tráfico.
Picoceldas	4-200 m	13 - 24 dBm	80	Interiores: aeropuertos, bancos, teatros, centros comerciales, elevada densidad de usuarios.
Femtoceldas	<100 m	1 - 13 dBm	25	Interiores: Hogar y oficina.



Existen dos parámetros determinantes en la elección del tipo de celda a utilizar: la cobertura y la capacidad.

- La cobertura de un sistema celular define un área geográfica en la cual se le garantiza al UE una Relación Señal a Interferencia (SIR, *Signal to Interference Ratio*) adecuada, para comunicarse con la BS y acceder a los recursos de esta [1] [4].
- La capacidad de un sistema celular se define como la cantidad de información que puede ser transmitida por un enlace en un instante de tiempo o, como la cantidad de usuarios que pueden ser atendidos simultáneamente en el sistema [2].

En este trabajo de grado se emplea la segunda definición de capacidad, la cual puede aumentar o disminuir con el uso de las siguientes técnicas:

- La sectorización y división celular, son técnicas que al implementarse de manera simultánea con el reuso de frecuencias, aumentan la capacidad al permitir un uso más eficiente del espectro electromagnético [4].
- El control del Grado de Servicio (GoS, *Grade of Service*) permite el aumento de la capacidad del sistema mediante la implementación de técnicas de bloqueo de llamadas cuando hay alta demanda de tráfico [4].
- Técnicas de control de potencia, las cuales controlan el nivel de interferencia del sistema y generan un aumento de la capacidad del mismo [4].

Aumentar el número de celdas en un sistema multicelular genera un aumento en el nivel de interferencia del mismo [4]; por tanto en los sistemas móviles multicelulares es necesario determinar el tipo de interferencia que lo afectan y los mecanismos que existen para mitigarla.

### 1.3. Interferencia

La aparición de nuevos servicios que demandan gran ancho de banda, ha convertido a la distribución y asignación adecuada del espectro electromagnético en un tema importante actualmente [9]. Al ser este un recurso limitado, la implementación del reuso de frecuencias se ha vuelto necesaria en los sistemas celulares, pero ello aumenta la posibilidad de aparición de interferencia en el sistema, la cual puede ser de dos tipos:

- **Interferencia de Canal Adyacente:** se presenta cuando la distancia entre frecuencias utilizadas en la misma celda es insuficiente. Esta interferencia deteriora una señal que está en una frecuencia cualquiera debido a la presencia de otra señal que está en una frecuencia cercana. En la figura 1.4 se aprecian dos señales transmitidas en frecuencias portadoras próximas,  $F_1$  y  $F_2$ . El traslape de estas dos



señales genera interferencia de canal adyacente. Aunque los efectos son críticos, se pueden mitigar con el uso de filtros en recepción [10].

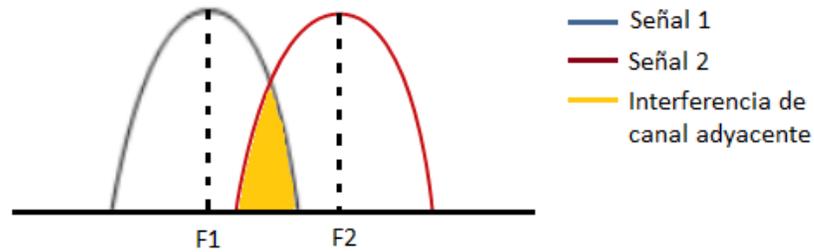


Figura 1.4. Interferencia de Canal Adyacente. Por los autores.

Debido a que el sistema del presente trabajo de grado opera con una sola frecuencia (portadora única), los efectos de esta interferencia no se analizan.

- **Interferencia Co-Canal:** se presenta en los UE asociados a celdas que operan con la misma frecuencia portadora, por esta razón, sus efectos no pueden mitigarse con un aumento en la potencia de transmisión de la BS ni de los UE, ya que esto sólo aumentaría la interferencia en las celdas co-canales vecinas [11]. En la figura 1.5 se observan dos señales transmitidas en la misma frecuencia portadora  $F$ , lo que produce interferencia co-canal.

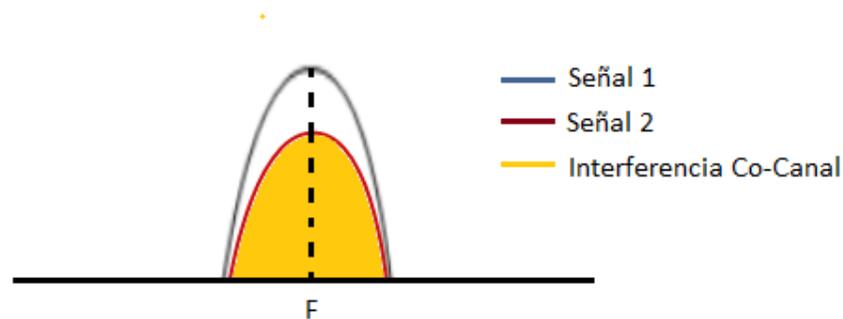


Figura 1.5. Interferencia Co-Canal. Por los autores.

Una forma de reducir los efectos de esta interferencia es separar físicamente las celdas co-canal por una distancia mínima denominada distancia de reutilización ( $D$ ); sin embargo, cuando un sistema se caracteriza con portadora única,  $D$  se vuelve mínima, y la probabilidad de aparición de interferencia co-canal máxima, obligando a tomar medidas de control que permitan garantizar un manejo eficiente de los recursos disponibles. Debido a esto, se introduce el concepto de Gestión de Recursos Radio.



## 1.4. Gestión de Recursos Radio

La Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) son estrategias y algoritmos que permiten hacer un adecuado control de los recursos radio de los sistemas de comunicación inalámbricos, como la potencia de transmisión, asignación de usuarios, tasas de transmisión, criterios de traspaso, esquemas de modulación y codificación, etc. De esta forma, la RRM tiene como objetivo utilizar el espectro de radiofrecuencia y la infraestructura de red radio existente, lo más eficientemente posible, garantizando la cobertura, capacidad y la QoS que se planificó para cada servicio ofrecido por la red [12].

Para garantizar estos aspectos de calidad, la RRM implementa estrategias como: PC, Control de Admisión (AC, *Admission Control*), Selección del Formato de Transmisión (PS, *Packet Scheduling*), Control de Traspaso, Control de Congestión (CC, *Congestion Control*), entre otras.

En el presente trabajo de grado se implementa un PC como mecanismo de control de interferencia.

### 1.4.1. Control de Potencia

El Control de Potencia es una técnica que permite reducir el consumo de potencia de los UE sin afectar la calidad de la comunicación [4].

El PC se implementa incluso en las mejores condiciones del enlace, puesto que la potencia recibida es inversamente proporcional a las pérdidas del sistema, como lo describe la ecuación 1.1. Las pérdidas se estiman elevadas, debido a las condiciones del canal de transmisión. Además se tiene que a mayor distancia y frecuencia, mayores son las pérdidas y menor será la potencia percibida en el receptor.

$$Prx = \frac{Ptx}{L}, \text{ donde } L \text{ son las pérdidas del sistema.} \quad (1.1)$$

Sin PC los UE más cercanos a la BS pueden saturar la transmisión de los UE que se encuentran a una mayor distancia, a este fenómeno se le conoce como Efecto Cerca-Lejos (NFE, *Near-Far Effect*).

En la figura 1.6 se observan tres UE transmitiendo a una BS en dos contextos distintos. El primero se da en un contexto sin PC, donde se aprecia que las potencias de transmisión de los UE (indicadas con flechas de color azul) son de igual magnitud y como consecuencia se tienen tres potencias de recepción diferentes en la BS, siendo  $Prx_3$  menor que  $Prx_2$  y mucho menor que  $Prx_1$ , por lo que la comunicación del UE<sub>3</sub> con la BS puede verse altamente afectada por la interferencia causada por el UE<sub>2</sub> y el UE<sub>1</sub>; el segundo caso se da en un



contexto con PC, donde se observa que las potencias de transmisión (indicadas con flechas de color rojo) varían en función de la distancia a la que se encuentran los UE, esto garantiza que las potencias recibidas en la BS sean aproximadamente iguales, de manera que todas las comunicaciones puedan llevarse a cabo correctamente.

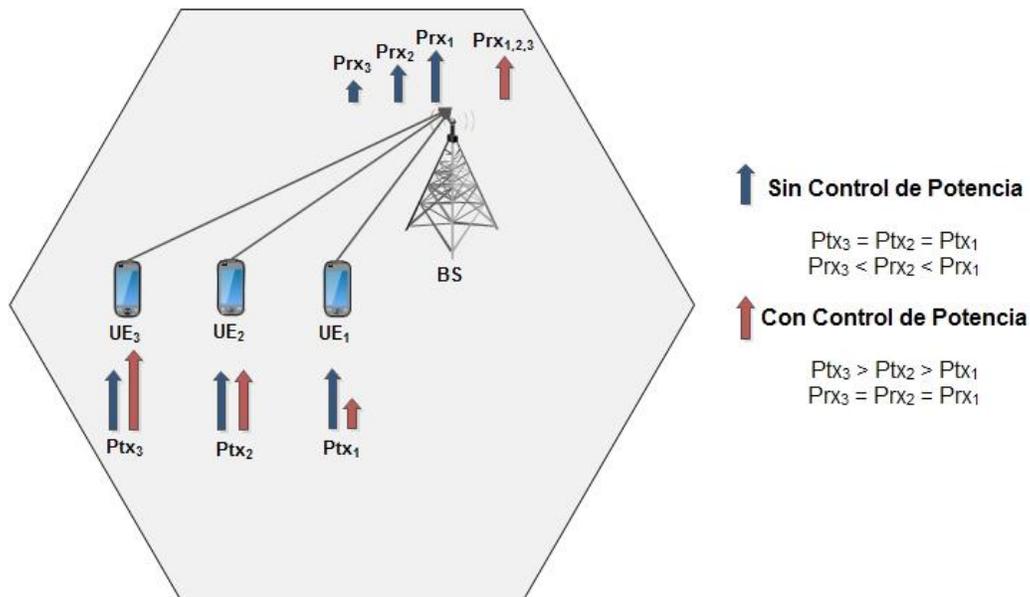


Figura 1.6. Efecto Cerca-Lejos. Adaptada de [13].

El objetivo del PC es garantizar que el recurso energético sea utilizado de la forma más eficiente posible, evitando un consumo excesivo e innecesario de la potencia de transmisión por parte de los UE. Para esto se definen dos mecanismos: lazo abierto y lazo cerrado [14].

- **Control de Potencia en Lazo Abierto:** este tipo de PC se implementa cuando no se ha establecido conexión entre el UE y la BS. Opera de la siguiente manera:
  1. El UE recibe la señal de la BS más cercana.
  2. Con la potencia recibida estima las pérdidas del trayecto.
  3. El UE calcula la potencia de transmisión en función de las pérdidas del trayecto y transmite con esta potencia a la BS.
  4. Se repite el proceso nuevamente, hasta que se logre establecer comunicación entre el UE y la BS.

Debido a que las frecuencias utilizadas en el DL son diferentes a las del UL, la estimación de las pérdidas del trayecto es inexacta, por lo que los resultados pueden no ser los esperados.



- **Control de Potencia en Lazo Cerrado:** se implementa cuando ya se ha establecido comunicación entre el UE y la BS. Su funcionamiento se describe a continuación:
  1. El UE transmite con una potencia determinada.
  2. La BS analiza la potencia recibida y calcula la SIR.
  3. Según la SIR calculada, la BS envía comandos al UE para que aumente o disminuya su potencia de transmisión de acuerdo con una SIR objetivo.
  4. El UE aumenta o disminuye su potencia y transmite nuevamente a la BS.
  5. Se repite el proceso nuevamente, hasta que el UE transmita con una potencia adecuada.

Este mecanismo presenta mayor exactitud, puesto que la BS es quien informa al UE con que potencia debe transmitir.

Hasta el momento, se han estudiado diversas técnicas y algoritmos de PC para encontrar el equilibrio entre una SIR que le permita al UE acceder a un servicio determinado y un bajo consumo energético. Entre estas técnicas se encuentran algunas como: mando de potencia centralizado, control de potencia distribuido, algoritmos de Foschini y Miljanic, entre otras [15]. En el presente trabajo se estudia la GT como herramienta para el desarrollo de un algoritmo de PC.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

---



# CAPÍTULO 2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TEORÍA DE JUEGOS

## 2.1. Generalidades

La Teoría de Juegos es una herramienta matemática que modela situaciones cooperativas y de conflicto entre diferentes entidades en las que se requiera un análisis del entorno para tomar decisiones. Esta herramienta ha sido ampliamente utilizada en la economía, política e incluso en el modelado de fenómenos biológicos [16]. Actualmente, la GT es muy utilizada en el área de las telecomunicaciones, modelando el problema de PC en redes celulares mediante el uso de juegos no cooperativos, además ha sido muy útil en situaciones que buscan optimizar los recursos radio disponibles [17] [18].

Cualquier situación puede ser modelada mediante la GT si se distinguen cuatro elementos principales:

- **Juego:** corresponde a la situación de conflicto que se quiere analizar.
- **Jugadores:** son todos los agentes participantes del juego.
- **Estrategias:** corresponden a las acciones o decisiones que se toman durante el juego.
- **Utilidad:** representa el beneficio obtenido por el jugador al implementar una determinada estrategia.

Se debe tener en cuenta que el análisis realizado con esta teoría no se enfoca en los componentes inmersos en ella, sino en el comportamiento estratégico<sup>1</sup> de los jugadores [16].

Como muchas otras ciencias, la Teoría de Juegos consiste en una colección de modelos que cumplen con ciertas características. Para la GT se tienen las siguientes características [17]:

---

<sup>1</sup> Un comportamiento puede llamarse “estratégico” cuando se adopta bajo la influencia conjunta del resultado propio y ajeno.



- Los resultados que se puedan obtener son conocidos por todos los involucrados en el juego.
- Se requiere de la especificación clara de las reglas de juego.
- Conocimiento común, esto implica que cada jugador es conocedor de las reglas del juego.
- Los jugadores tienen la capacidad y la información necesaria para calcular la utilidad esperada, esto debido a que cada acción que ejecutan depende de la experiencia y conocimiento de los posibles resultados (Racionalidad).

El objetivo de la GT no es la determinación de la mejor solución, sino evidenciar cuales son los resultados que se pueden obtener dependiendo de las decisiones tomadas por los jugadores.

Inicialmente la clasificación de los tipos de juegos se hace en dos grandes grupos: Juego Cooperativo y Juego No Cooperativo, aunque en la actualidad, debido a la cantidad de aplicaciones de la GT, esta clasificación se extiende a un mayor número de tipos de juegos.

## 2.2. Juego Cooperativo

También es llamado “Juego Coalicional<sup>2</sup> o con transferencia de utilidad”. En este juego se plantea un escenario en el cual, los jugadores pueden comunicarse entre sí y hacer alianzas o acuerdos antes de obtener los resultados. Para esto, los jugadores tienen información a priori de las coaliciones que se pueden formar. Esta información les indica que tan valiosa es la unión y si realmente vale la pena mantenerla, en caso de no ser así, la coalición se deshace. En este tipo de juego, el término “solución” se le otorga a una propuesta de coalición que garantice estabilidad, es decir, que ninguno de los participantes en dicha coalición puede romperla si con ésta se logran los resultados deseados [19].

## 2.3. Juego No Cooperativo

El Juego No Cooperativo se distingue por el egoísmo que presentan los jugadores, procurando obtener para sí mismos el máximo beneficio sin importar las condiciones de los demás participantes del juego [15].

Existen dos formas de representar los juegos no cooperativos:

---

<sup>2</sup> Se le llama Juego Coalicional debido a las alianzas o acuerdos que se pueden hacer entre jugadores con el objetivo de obtener mejores resultados.



- **Forma extensiva:** cada jugador toma su estrategia de manera secuencial, es decir, en un instante de tiempo sólo un jugador puede escoger o cambiar su estrategia. Para esto, los jugadores utilizan un árbol de decisión, como el que se muestra en la figura 2.1, cuyas ramas indican las estrategias que cada jugador puede tomar.

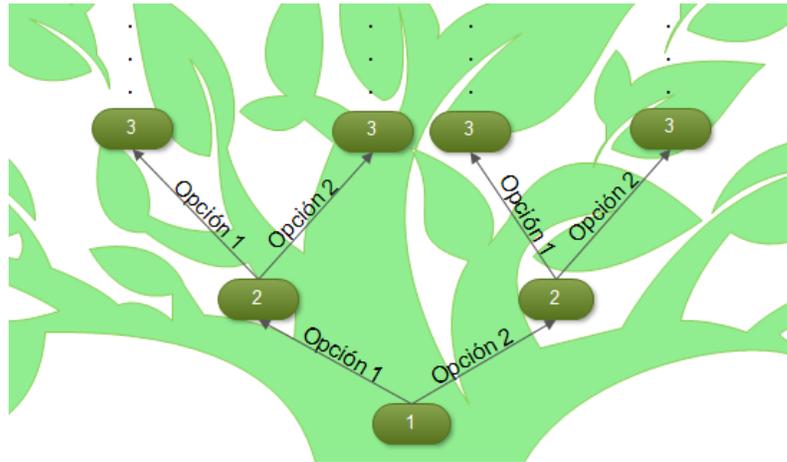


Figura 2.1. Árbol de decisión. Por los autores.

La representación de un juego en forma extendida se presenta en la ecuación 2.1.

$$G = (N, V, v_{root}, \pi, \{V_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}) \quad (2.1)$$

Donde  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  es un conjunto no vacío que representa los jugadores,  $V$  es el conjunto de nodos o vértices del árbol,  $v_{root}$  identifica el nodo raíz,  $\pi$  es la función predecesora,  $V_n$  es un subconjunto de  $V$  el cual identifica las diferentes rutas del árbol y  $u_n$  es la utilidad obtenida por el n-ésimo jugador.

- **Forma estratégica o normal:** a diferencia de la forma extensiva, los jugadores pueden tomar o cambiar sus estrategias simultáneamente, lo cual permite que en cada instante de tiempo se puedan obtener mayores utilidades en el juego.

En la representación normal, el juego está definido por tres elementos, como se observa en la ecuación 2.2.

$$G = (N, \{A_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}) \quad (2.2)$$

$N = \{1, 2, \dots, N\}$  es un conjunto no vacío que representa los jugadores,  $A_n = \{a_1, a_2, \dots, a_w\}$  es el conjunto compuesto por las  $w$  estrategias o acciones que tiene cada



jugador y  $u_n$  es la utilidad obtenida por el  $n$ -ésimo jugador al ejecutar la acción  $a_n \in A_n$  [15].

Una de las desventajas de esta representación es que el juego puede saturarse y los resultados obtenidos pueden no ser los mejores, debido a que todos los jugadores buscan obtener la máxima utilidad en el mismo instante de tiempo. Para evitar esto, se introduce el concepto de Equilibrio de Nash.

### 2.3.1. Equilibrio de Nash

El Equilibrio de Nash (NE, *Nash Equilibrium*) busca la obtención de una o más estrategias óptimas en un juego. Se dice que un conjunto de estrategias está en NE si ningún jugador puede obtener mejores resultados con un cambio unilateral de estrategia [15].

En un juego definido en forma normal, un perfil de acción  $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_N\} \in A$ , es un conjunto constituido por todas las acciones ejecutadas por los jugadores, donde  $\mathbf{a}_{-n}$  corresponde al perfil de acción de todos los jugadores excluyendo al  $n$ -ésimo jugador, de tal manera que para un jugador  $n$  se puede definir la Mejor Respuesta (BR, *Best Response*) según las estrategias escogidas por los demás jugadores [20], como se indica en la ecuación 2.3.

$$BR_n(\mathbf{a}_{-n}) = \arg \max u_n(a_n, \mathbf{a}_{-n}) \quad \forall a_n \in A_n \quad (2.3)$$

**Definición:** dado el juego en forma normal  $G$ , un perfil de acción  $\mathbf{a}^* = (a_n^*, a_{-n}^*)$ , representa un NE si para todo  $\mathbf{a}^* \in BR(\mathbf{a}^*)$  y  $n \in N$  se cumple la desigualdad 2.4.

$$u_n(a_n^*, a_{-n}^*) \geq u_n(a_n, a_{-n}^*) \quad \forall a_n \in A_n \quad (2.4)$$

De esta definición se resalta que cuando se ha llegado a la condición de NE, ningún jugador puede cambiar de forma individual su estrategia sin alterar el óptimo resultado del juego; sin embargo, si todos los jugadores reestructuran sus estrategias, puede encontrarse un conjunto distinto de estrategias que consiga un resultado igualmente óptimo. Debido a esto, en un juego cualquiera se pueden encontrar más de dos combinaciones de estrategias (una estrategia por jugador) que estén en NE [15].

El alcanzar la condición de NE en un juego no implica que se obtenga el mejor resultado conjunto sino, sólo la mayor utilidad posible para cada jugador, debido a esto, es necesario definir otro equilibrio que permita la obtención de un mejor resultado del juego, este es el Equilibrio de Satisfacción.



### 2.3.2. Equilibrio de Satisfacción

Para definir el Equilibrio de Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*), es necesario determinar una Función de Satisfacción  $f_n(u_n)$ , la cual retorna 1 si el jugador es satisfecho y 0 si no es satisfecho, como se muestra en la ecuación 2.5.

$$f_n(u_n) = \begin{cases} 0, & u_n < \Gamma_n \\ 1, & u_n \geq \Gamma_n \end{cases} \quad (2.5)$$

Donde  $\Gamma_n$  corresponde al umbral de satisfacción para el n-ésimo jugador.

**Definición:** un SE es una condición que busca que los jugadores del juego  $G$  superen un mínimo beneficio, procurando que la mayor cantidad de jugadores posibles sean satisfechos.

Inmerso en el concepto de SE se encuentra el Principio de Satisfacción, el cual establece que los jugadores que logran satisfacer sus utilidades no deben cambiar sus estrategias (ver ecuaciones 2.6 y 2.7), mientras los demás jugadores, posiblemente las cambien, intentando alcanzar un SE [15] [21].

$$f_n(\mathbf{U}_n(u)) = 1 \quad \forall n \in N \quad (2.6)$$

$$a_n^{t+1} = a_n^t \quad \forall n, t : f_n(u_t) = 1 \quad (2.7)$$

En un sistema de comunicaciones móviles, la utilidad de la función de satisfacción representa cualquier parámetro cuantificable que pueda significar un beneficio en la comunicación del usuario [15]. En comunicaciones, desde la perspectiva del operador, es más viable garantizar al usuario un servicio que supere un valor de calidad aceptable, que garantizar los máximos recursos del sistema de comunicaciones, ya que esto genera un uso excesivo y egoísta de los recursos disponibles.

Dado que el SE es una extensión del NE, se obtienen beneficios adicionales como:

- Mantener la estrategia de un jugador, si esta genera una utilidad superior o igual a un umbral.
- Aumentar el número de jugadores con una utilidad superior o igual a un umbral.
- Minimizar el egoísmo de los jugadores.

Cuando se introduce el SE al juego  $G$ , este se redefine de la siguiente manera:

$$G = (N, \{A_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}, \{f_n\}_{n \in N}) \quad (2.8)$$

Debido a que las estrategias tomadas por los jugadores cambian en cada instante de tiempo, es necesario implementar una técnica que permita a los jugadores aprender las estrategias con las que se alcanzó un SE; para ello, se introduce el concepto de Aprendizaje Reforzado.



## 2.4. Aprendizaje Reforzado

El Aprendizaje Reforzado (RL, *Reinforcement Learning*) es un área de la inteligencia artificial que estudia el comportamiento de los agentes en un entorno dinámico. Su estudio se concentra en tres componentes básicos:

- **Agente:** es el que toma las acciones en un determinado instante de tiempo.
- **Entorno:** corresponde a todas las cosas con las que el agente interactúa e influyen en la toma de decisiones del mismo.
- **Acciones:** lo que el agente puede hacer. Cada acción está asociada a una recompensa.

El RL consiste en observar las reacciones de un agente en diferentes situaciones y analizar cuales decisiones son las adecuadas para obtener el resultado deseado y cuales le permiten maximizar la recompensa obtenida [15].

La figura 2.2 muestra de forma general el comportamiento del RL, en ella se observa que los agentes analizan su entorno y según su estado, seleccionan una acción que de manera recíproca afecta al entorno y genera una recompensa, la cual puede ser positiva o negativa, esta acción se almacena en forma de dupla: acción-recompensa.

La acción que se escoge en el instante posterior, está en función de mejorar la recompensa obtenida en el instante previo. Finalmente, después de un número de repeticiones del ciclo, se espera que los agentes encuentren la acción adecuada para alcanzar el objetivo propuesto [22].

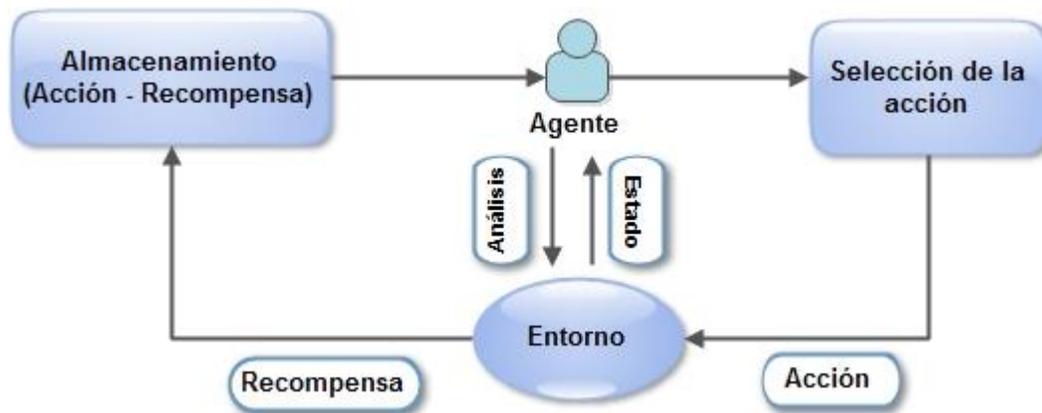


Figura 2.2. Comportamiento del Aprendizaje Reforzado. Adaptada de [22].



Cuando se incluye el concepto de RL en la GT, se obtienen jugadores racionales que son capaces de asociar la utilidad obtenida con la acción ejecutada, garantizando que cada jugador actualice su estrategia según los cambios que se den en el entorno.

Dentro del RL se introduce una nueva variable llamada Tasa de Aprendizaje (LR, *Learning Rate*), la cual determina si el aprendizaje es rápido o lento. La variación de la LR se basa en el Principio de Ganar o Aprender Rápido (WoLF, *Win or Learn Fast*); la esencia de este método consiste en aprender rápido cuando se pierde y aprender cautelosamente cuando se gana. En otras palabras, la intención de este principio es que el aprendiz se adapte rápidamente cuando está obteniendo recompensas negativas, de lo contrario debe hacerlo lentamente debido a que los demás jugadores están cambiando sus estrategias en el mismo instante de tiempo [23].

En el presente trabajo de grado se hace necesaria e importante la inserción del RL porque permite que la selección de las potencias de transmisión se haga de forma dinámica.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

---



# CAPÍTULO 3 APLICACIÓN DE UN MODELO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN UN SISTEMA MULTICELULAR

A partir de las características y elementos que componen los Sistemas Móviles Celulares y la Teoría de Juegos descritos en los capítulos anteriores, en este se presenta, la aplicación de un modelo de PC basado en GT en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única. Para esto, a continuación se define el sistema multicelular en el cual se realizará la aplicación del algoritmo.

## 3.1. Definición del Sistema Multicelular

La red objeto de estudio será una red homogénea multicelular conformada por  $K$  Microceldas donde  $N$  UE acceden a los recursos de las  $K$  Micro Estaciones Base (MBS, *Micro Base Station*)<sup>3</sup> que dan cobertura al sistema de comunicaciones. La red ofrece servicios de voz y datos a un área de aproximadamente 16 Km<sup>2</sup>, en un ambiente peatonal.

La figura 3.1 muestra el diagrama general de bloques del sistema en el cual se observan los elementos principales a tener en cuenta en el sistema de comunicaciones móvil multicelular. Este diagrama se elabora teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- La variable  $K$  corresponde al número de MBS presentes en el sistema.
- Los UE transmiten utilizando un canal denominado  $CH$  cuya frecuencia portadora es igual a 900Mhz.

---

<sup>3</sup> Una MBS es una BS que da servicio a un área pequeña denominada Microcelda con una baja potencia de transmisión. Es utilizada para dar cobertura en áreas limitadas y que tengan alta densidad de tráfico.



- Cada MBS asocia a los UE que se encuentren dentro del área de servicio de su celda y los identifica con el subíndice propio de la celda, particularmente, los UE asociados a la MBS<sub>1</sub> reciben el nombre de UE<sub>1</sub> y así sucesivamente.
- Cada MBS atiende a los UE asociados a su celda e identifica como interferencia las señales recibidas de los UE pertenecientes a otras celdas (flechas de color rojo).

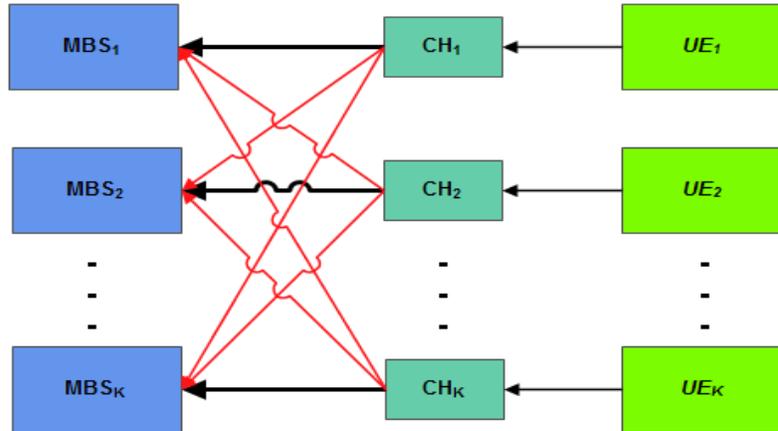


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema. Por los autores.

Dado que el sistema es con portadora única, el nivel de interferencia es mucho mayor que el nivel de potencia de ruido, por tanto también se tiene un sistema limitado por interferencia [2]. En este contexto, se adapta un modelo de PC basado en la GT que permite controlar el nivel de interferencia presente en este sistema.

## 3.2. Modelo de Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos

El algoritmo de PC propuesto, está basado en el algoritmo de PC basado en GT que fue implementado en una única celda de un sistema multicelular [15], en este trabajo de grado el algoritmo se implementa en todas las celdas de un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única. Para realizar la implementación, primero se define el tipo de juego en el que se fundamenta dicho algoritmo.



### 3.2.1. Definición del juego

El algoritmo se basa en un juego No Cooperativo  $G$ , representado de forma normal que aplica el concepto de SE y se apoya en el RL para mantener las estrategias tomadas por los UE que fueron satisfechos. Para realizar la descripción del algoritmo, es necesario identificar los elementos propios de la GT en el sistema inalámbrico multicelular.

1. Los UE del sistema asumen el rol de jugadores.
2. Los niveles de potencia que puede escoger el  $UE_n$  conforman el conjunto de estrategias  $\{\mathbf{P}_n\}_{n \in N}$ .
3. La Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) obtenida por cada UE, conforman el conjunto de utilidades del juego  $\{u_n\}_{n \in N}$ . Particularmente, la SINR obtenida por el usuario  $n$  que se encuentra en la celda  $c$ , denotado como  $UE_{n,c}$ , está definida por la ecuación 3.1.

$$u_n(p_{tn}) = SINR_{n,c} = \frac{\alpha_n p_{tn}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq n}^L \alpha_j p_{tj}}, \quad c \in K, j \in L \text{ y } \forall n \in N \quad (3.1)$$

Donde  $\alpha_n$  corresponde a la ganancia del sistema que experimenta el  $UE_{n,c}$ ,  $\eta$  es la potencia de ruido térmico,  $i_0$  es la interferencia generada en la  $MBS_c$ , causada por los UE que no se encuentran asociados a esta celda, la cual se obtiene mediante la ecuación 3.2 y  $L$  es el número de UE presentes en la celda  $c$ .

$$i_0 = \sum_{n=L+1}^N \alpha_n p_{tn} \quad (3.2)$$

4. Se define una función de satisfacción  $\{f_n\}_{n \in N}$  impuesta para cada UE presente en el sistema, dada por la ecuación 3.3.

$$f_n = \{p_n \in \mathbf{P}_n : u_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (3.3)$$

Donde cada UE busca alcanzar o superar ligeramente el umbral  $\Gamma_n$  establecido para su servicio.

Por tanto el juego queda definido de la siguiente manera:

$$G = (N, \{\mathbf{P}_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}, \{f_n\}_{n \in N}) \quad (3.4)$$

Una vez definido el juego se procede a describir el algoritmo propuesto en el presente trabajo de grado.



### 3.2.2. Descripción del algoritmo

El algoritmo tiene en cuenta dos estados,  $t = 0$  y  $t > 0$ , en los cuales se llevan a cabo los procesos descritos a continuación.

**Estado 1:** En  $t = 0$ , a cada elemento del conjunto de potencias  $P_n$  se le asigna aleatoriamente una probabilidad del vector de probabilidades definido por  $\pi_n(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_{10}(t)\}$ , donde a cada elemento le corresponde un elemento del conjunto  $P_n$  (correspondencia uno a uno). Posteriormente, cada UE escoge una potencia de transmisión inicial  $p_n$  de acuerdo al elemento con mayor probabilidad del conjunto de potencias  $P_n$ . Cada MBS del sistema calcula la utilidad alcanzada por los UE asociados a ella teniendo en cuenta la estrategia seleccionada y envía este dato al UE para que actualice sus estrategias.

**Estado 2:** Para un  $t > 0$ , cada UE calcula el valor de  $b_{n,t}$  que está dado por la ecuación 3.5.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + u_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (3.5)$$

Donde,  $b_{n,t}$  es un valor temporal que le indica al  $UE_n$  que tan rápido debe cambiar la estrategia tomada en el instante anterior,  $M_n$  corresponde al máximo valor que puede alcanzar la función de utilidad,  $u_{n,t-1}$  es la utilidad obtenida en el instante previo por el  $UE_n$  y  $\Gamma_n$  corresponde al umbral de satisfacción impuesto para cada servicio.

A continuación, se actualiza el vector de probabilidades de acuerdo a la función descrita en la expresión 3.6.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)) & \text{si } \beta \geq u_{n,t-1} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)) & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (3.6)$$

Donde  $\beta$  depende de la tolerancia que tenga el sistema a la interferencia. Las funciones  $g'$  y  $g$  se definen en las ecuaciones 3.7 y 3.8, respectivamente.

$$g'(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (\mathbf{1}_{\{p_n(t)=p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (3.7)$$

$$g(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (\mathbf{1}_{\{p_n(t) \neq p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (3.8)$$

Donde  $\lambda_{n,t}$  corresponde a la LR del  $UE_n$  [15], la cual se define por la siguiente expresión:

$$\lambda_{n,t} = \frac{1}{1+t} \quad (3.9)$$

En las ecuaciones 3.7 y 3.8, se observa que si la SINR alcanzada por un UE está dentro del rango establecido, la probabilidad que tiene la potencia de transmisión escogida se incrementa, obligando al UE a escoger nuevamente esta potencia. Mientras que si la utilidad



obtenida no alcanza o sobrepasa el rango, la probabilidad de la potencia se disminuye de tal manera que el UE tenga que cambiar su estrategia.

La inserción de  $\beta$  implica un reajuste en la definición de la Función de Satisfacción, como se observa en la ecuación 3.10.

$$f_n(u_n) = \begin{cases} 1 & \text{si } \beta + \Gamma_n \geq u_n \geq \Gamma_n \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (3.10)$$

Con los procesos descritos anteriormente, se obtiene el diagrama de flujo del algoritmo de PC basado en la GT ilustrado en la figura 3.2, en el cual los bloques de color azul representan los procesos ejecutados por el  $UE_n$ , y el bloque de color verde representa el proceso ejecutado por la MBS que atiende al  $UE_n$ .

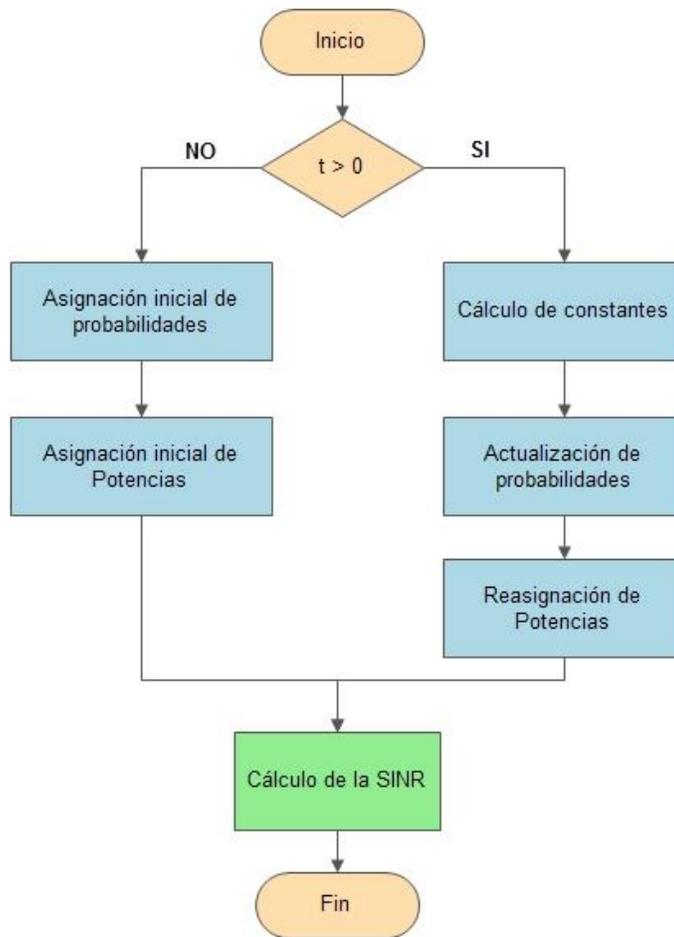


Figura 3.2. Diagrama de flujo del algoritmo de PC basado en GT. Por los autores.



Para evaluar el comportamiento del modelo de PC en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única, se implementa en el mismo sistema un modelo de Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*), debido a que este se utiliza como punto de referencia para el adecuado comportamiento de cualquier modelo de PC en sistemas limitados por interferencia [2].

### 3.3. Modelo de Control Ideal de Potencia

El IPC busca minimizar la interferencia generada por los UE. Aplicando esta técnica se garantiza que las potencias recibidas en la MBS sean aproximadamente iguales, sin importar la distancia a la cual se encuentren los UE, de esta manera se disminuye el efecto cerca-lejos que se pueda presentar en el sistema [15]. Para que sea posible la aplicación de un IPC, es necesario conocer la SINR correspondiente al servicio ofrecido. Mediante la ecuación 3.11, se encuentra el valor de la SINR requerida por el usuario  $i$  que se encuentra en la celda  $c$ .

$$SINR_{i,c} = \frac{\alpha_i p_{ti}}{\eta + \sum_{j=1, j \neq i}^L \alpha_j p_{tj}}, \quad i, j \in L \text{ y } c \in K \quad (3.11)$$

Donde  $\alpha_i$  corresponde a la ganancia del sistema que experimenta el usuario  $i$ ,  $p_{ti}$  es la potencia de transmisión del usuario  $i$ ,  $\eta$  constituye el ruido térmico presente en el sistema,  $L$  es el número de usuarios presentes en la celda  $c$  y  $K$  es el número de celdas del sistema multicelular.

Para realizar el análisis de IPC, se toma el sistema de ecuaciones definido en 3.12, el cual permite determinar la SINR requerida por cada UE presente en la celda  $c$ .

$$\begin{aligned} \eta + \sum_{j=1, j \neq 1}^L \alpha_j p_{tj} &= \frac{\alpha_1 p_{t1}}{SINR_{1,c}}, \\ \eta + \sum_{j=1, j \neq 2}^L \alpha_j p_{tj} &= \frac{\alpha_2 p_{t2}}{SINR_{2,c}}, \\ &\vdots \\ \eta + \sum_{j=1, j \neq L}^L \alpha_j p_{tj} &= \frac{\alpha_L p_{tL}}{SINR_{L,c}} \end{aligned} \quad (3.12)$$

En este sistema de ecuaciones se define  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L\}$  como el vector de ganancias del sistema, de tamaño  $1 \times L$ ,  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_L\}$ , como el vector conformado por las potencias



requeridas para satisfacer los requerimientos de SINR que demanda cada servicio,  $\boldsymbol{\eta} = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_L\}$  es el vector de ruido térmico de orden  $L \times 1$  y finalmente, se define  $\mathbf{SINR} = \{SINR_1, SINR_2, \dots, SINR_L\}$ , como el vector de orden  $L \times 1$  que contiene los requerimientos de SINR para cada UE presente en la celda  $c$ . En la ecuación 3.13 se presenta un arreglo matricial de ecuaciones, en el cual  $\mathbf{P}$  constituye el vector de incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{SINR_{1,c}} & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_L \\ -\alpha_1 & \frac{\alpha_2}{SINR_{2,c}} & \ddots & -\alpha_L \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & \frac{\alpha_L}{SINR_{L,c}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_L \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Utilizando el sistema de ecuaciones matriciales expresado en la ecuación 3.13 se puede encontrar el conjunto de potencias de transmisión que cumplen con el requerimiento de SINR para cada servicio, como se observa en la ecuación 3.14.

$$\mathbf{AP} = \mathbf{n} \quad (3.14)$$

Donde,  $\mathbf{A}$  es una matriz de orden  $L \times L$  la cual está definida por la expresión 3.15.

$$\mathbf{A} = \left\{ \begin{array}{ll} -\alpha_j & \text{si } i \neq j \\ \frac{\alpha_i}{SINR_{i,c}} & \text{si } i = j \end{array} \right\}, \forall i, j \in L \quad (3.15)$$

Si y solo si la matriz  $\mathbf{A}$  es no singular [15], el vector de potencias de transmisión  $\mathbf{P}$  puede ser expresado mediante la siguiente ecuación.

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{n} \quad (3.16)$$

Esta expresión asigna la potencia de transmisión a cada  $UE_i$  dentro de la celda  $c$  del sistema. Dado que también existen UE fuera de esta celda, es necesario distinguir la interferencia generada por los usuarios que no estén asociados a ella. En la ecuación 3.17 se considera de manera independiente la interferencia generada por los usuarios que se encuentran asociados a las demás celdas.

$$SINR_{i,c} = \frac{\alpha_i p_{ti}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^L \alpha_j p_{tj}}, \quad i, j \in L \text{ y } c \in K \quad (3.17)$$

Donde  $i_0$  corresponde a la interferencia generada en la MBS debida a los UE que no se encuentran asociados a esta, como se indica en la ecuación 3.18.

$$i_0 = \sum_{n=L+1}^N \alpha_n p_{tn} \quad (3.18)$$



En la ecuación 3.19 se expresa el resultado para la celda  $c$ . Este resultado debe implementarse en cada celda del sistema multicelular.

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{n} + i_0) \quad (3.19)$$

En la figura 3.3 se observa el diagrama de flujo que describe el algoritmo de IPC, en el cual, los bloques de color verde representan los procesos ejecutados por cada MBS del sistema, mientras que el bloque de color azul constituye los procesos que ejecuta cada UE presente en el sistema. Se aprecia que en este algoritmo la mayoría de los procesos los realizan las MBS, agregando mayor procesamiento de información a estas. Mientras que en el diagrama de flujo del algoritmo de PC basado GT se observa que las MBS realizan pocos procesos en comparación al algoritmo de IPC.

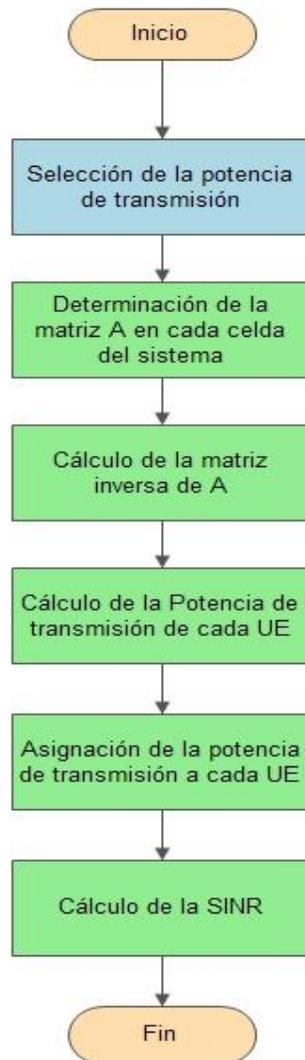


Figura 3.3. Diagrama de flujo de IPC. Por los autores.



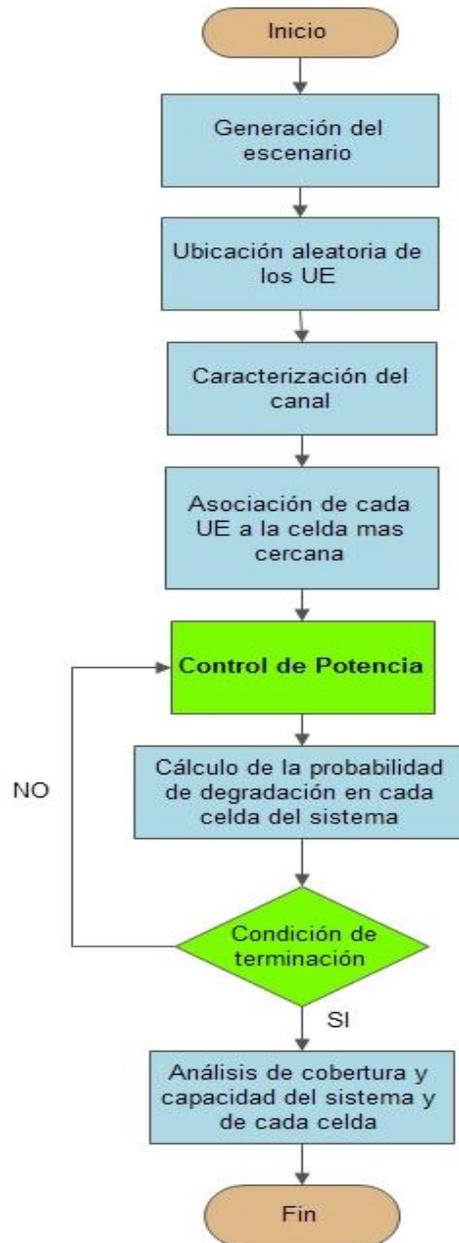
Con el sistema multicelular definido y con la descripción de los dos modelos de PC, se realiza el diagrama de flujo general del sistema, el cual describe el funcionamiento del sistema implementando un modelo de PC.

### 3.4. Diagrama de Flujo General del Sistema

El siguiente procedimiento describe el comportamiento general del sistema:

1. El sistema inicia con la transmisión de una señal por parte de los UE presentes en el sistema multicelular.
2. A las señales transmitidas por los UE se les aplican los efectos de atenuación y desvanecimiento del canal de transmisión.
3. Cada UE se asocia a la MBS que se encuentre a menor distancia.
4. Cada MBS atiende a los UE asociados a su celda e identifica como interferencia la señal de los demás UE presentes en el sistema multicelular.
5. En cada MBS y UE del sistema se implementa el algoritmo de PC correspondiente.
6. Cada MBS calcula la Probabilidad de Degradación (OP, *Outage Probability*) con base en el total de UE presentes y al número de UE atendidos por esta celda.

De acuerdo al anterior procedimiento se construye el diagrama general de flujo del sistema descrito en la figura 3.4, en el cual se aprecia que el proceso inicia configurando y determinando las variables necesarias para la generación del escenario y de los UE de análisis, luego se realiza la asociación de cada UE a la celda más cercana. Posteriormente, se implementa un algoritmo de PC, ya sea IPC o PC basado en la GT. Cada MBS calcula su probabilidad de degradación y finalmente, se realiza un análisis estadístico de la capacidad y cobertura del sistema.



**Figura 3.4.** Diagrama de flujo general del sistema. Por los autores.

Con base en el diagrama de flujo de la figura 3.4, se realiza una simulación a nivel de sistema<sup>4</sup> de la red multicelular definida y se comparan los resultados obtenidos al implementar el modelo de PC propuesto en este trabajo de grado con los resultados obtenidos en [15].

<sup>4</sup> En una simulación a nivel de sistema se realiza un análisis del comportamiento general del sistema, permitiendo modelar características que a nivel de enlace no se pueden tener en cuenta.



# CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los diagramas construidos en el capítulo anterior y teniendo en cuenta las limitaciones físicas presentadas a continuación, en este capítulo se desarrolla una adaptación de la metodología de simulación descrita en [24] que conlleva a la obtención y análisis de los resultados.

## 4.1. Desarrollo de la Simulación

### 4.1.1. Limitaciones físicas del sistema

El sistema a simular tiene las siguientes restricciones:

- **Movilidad:** el diseño del sistema no tiene en cuenta la movilidad de los UE. Esto se puede definir como una limitación debido a que se restringe al usuario a permanecer estático en el escenario de simulación. Debido a esto, para el modelado del canal no se considera el desvanecimiento tipo Rayleigh.
- **Traspasos:** una de las consecuencias de no implementar movilidad en el sistema es que se evita el proceso de traspasos, de manera que se disminuye el número de procesos requeridos en la implementación de los algoritmos de PC.
- **Modelo de propagación:** el modelo de propagación utilizado para modelar el canal de transmisión no tiene en cuenta las alturas de los UE ni de las MBS [25], tampoco las pérdidas por lluvia o gases, esto último debido a que la frecuencia de operación del sistema es menor a 1Ghz [26].



- **Única portadora:** el sistema implementado es limitado por interferencia con portadora única, es decir que los UE transmiten a la MBS con la misma frecuencia de operación.
- **Estudio del UL:** Debido a las limitaciones de potencia de transmisión que tiene el UE por cuestiones de movilidad y tamaño, el UL se considera altamente afectado por la interferencia generada en el sistema, a diferencia del DL, cuyas condiciones pueden verse mejoradas con un aumento en la potencia de transmisión por parte de la MBS. Por tal razón la implementación y el análisis del mecanismo de PC basado en la GT se realizan en el UL.

## 4.1.2. Desarrollo metodológico

Para el desarrollo del trabajo de grado se sintetizó la metodología de simulación descrita en [24] en cuatro fases:

- **Selección de la herramienta de simulación:** se escoge, entre dos herramientas de simulación propuestas, la más adecuada para el desarrollo del trabajo.
- **Codificación del sistema multicelular:** se describe de manera general como se realizó la codificación del sistema multicelular definido.
- **Definición de los escenarios y casos de simulación:** se describen los escenarios y casos de simulación.
- **Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación:** se realiza una descripción de los parámetros de cada escenario.

### 4.1.2.1. Selección de la herramienta de simulación

Para la selección de la herramienta de simulación, se exploraron dos opciones, Scilab 5.4.1 y Matlab R2012a, las cuales cumplen los requisitos de programación para el desarrollo del trabajo de grado, sin embargo, después de analizar sus características, se seleccionó el software de simulación Matlab debido a las siguientes razones:

- ✓ Cuenta con mayor reconocimiento a nivel internacional, frente a la comunidad investigativa y científica.
- ✓ Aunque Matlab no es de libre distribución, la Universidad del Cauca tiene las licencias necesarias para trabajar con esta herramienta.
- ✓ La programación se lleva a cabo mediante un lenguaje similar a uno de alto nivel como BASIC o C, que permiten agrupar sentencias que se utilizan frecuentemente dentro de un programa que puede ser invocado posteriormente, lo que permite tener un mejor manejo de las funciones.



- ✓ Cuenta con soporte para el modelado y simulación de sistemas de telecomunicaciones.

#### **4.1.2.2. Codificación del sistema multicelular**

La codificación en Matlab se lleva a cabo mediante el uso de estructuras. Se definen dos estructuras básicas, la primera denominada “Celdas” la cual contiene información acerca de la identificación y ubicación de la MBS en el escenario de simulación, la potencia que recibe de cada UE, entre otros parámetros. La segunda, llamada “Usuarios”, contiene información correspondiente a la ubicación del UE en el escenario, identificación del UE, potencia de transmisión, efectos del canal de transmisión, tipo del servicio al cual desea acceder, SINR obtenida en cierto instante de tiempo, distancia a la celda a la cual se encuentra asociado e información de ésta. Finalmente, para la creación del escenario de simulación, se utiliza el número de instancias de la estructura “Celdas” correspondiente al número de MBS que se requieran en el escenario y múltiples instancias de la estructura “Usuarios”.

La utilización de estructuras en la codificación del sistema proporciona flexibilidad y permite manipular fácilmente los parámetros del sistema, dejando abierta la posibilidad de inserción de otros parámetros para realizar otros análisis sobre un sistema móvil multicelular.

#### **4.1.2.3. Definición de los escenarios y casos de simulación**

Se considera al interior del sistema 300 UE ubicados aleatoriamente siguiendo una distribución uniforme con media 0 y desviación estándar igual a 1. El radio de las celdas que conforman el sistema multicelular varía entre 1Km y 0.5Km, generando dos escenarios<sup>5</sup> de simulación, el primero con 7 MBS y un área geográfica de 18.19 Km<sup>2</sup> y el otro con 25 MBS y un área geográfica de 16.24 Km<sup>2</sup>. En las figuras 4.1 y 4.2 se observan los escenarios 1 y 2 respectivamente.

---

<sup>5</sup> El área geográfica de cada escenario se calcula teniendo en cuenta un número entero de celdas, donde la suma del área de cada una de estas sea aproximadamente 16 Km<sup>2</sup>.

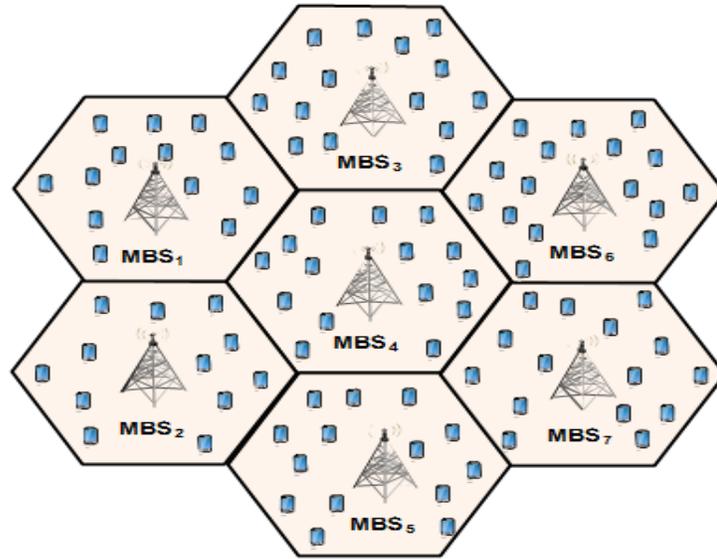


Figura 4.1. Escenario de simulación 1. Por los autores.

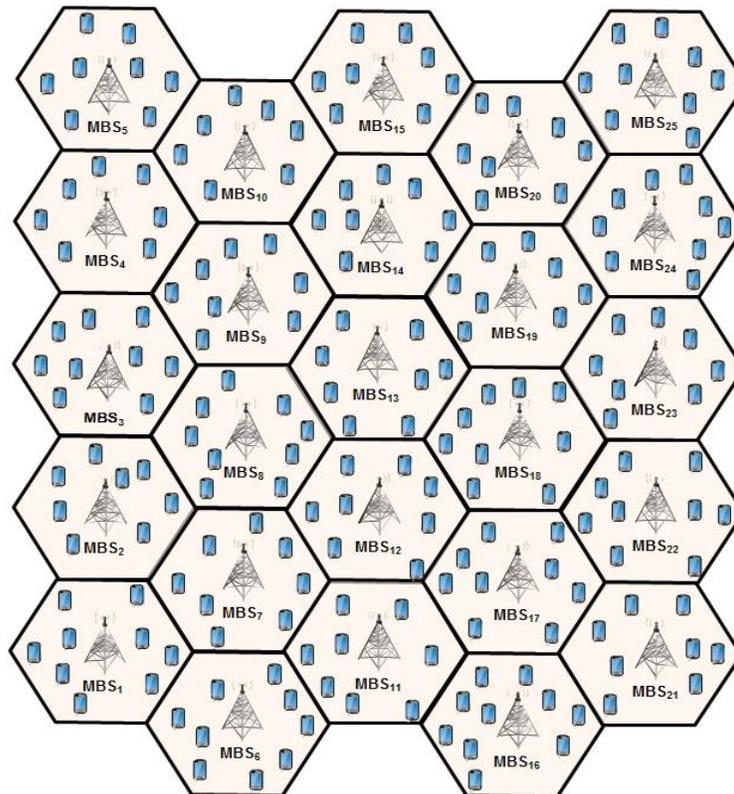


Figura 4.2. Escenario de simulación 2. Por los autores.



En cada escenario se definen tres casos de simulación, en los cuales, el sistema ofrece un tipo de servicio diferente, es decir, el requerimiento de SINR varía en cada caso para observar el efecto que tiene este parámetro en la capacidad y cobertura del sistema multicelular. La tabla 2 describe los escenarios y casos de simulación.

**Tabla 2.** Escenarios y casos de simulación.

<b>Escenarios de simulación</b>		
<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	
Radio de las celdas: 1Km Área geográfica: 18.19Km <sup>2</sup> Número de MBS: 7	Radio de la celda: 0.5Km Área geográfica: 16.24Km <sup>2</sup> Número de MBS: 25	
<b>Casos de simulación</b>		
<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
Voz PC basado en GT - IPC	Datos PC basado en GT - IPC	Voz y Datos PC basado en GT – IPC

Cabe resaltar que el mecanismo de PC basado en GT se implementa y analiza en todas las celdas del sistema, sin embargo se realiza un estudio adicional en la celda ubicada en el centro de los escenarios, para realizar la comparación con los resultados obtenidos al aplicar un mecanismo de PC basado en GT en una única celda de un sistema multicelular limitado por interferencia [15].

#### **4.1.2.4. Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación**

La tabla 3 presenta los parámetros de simulación seleccionados para la configuración de la red en cada uno de los escenarios propuestos.

**Tabla 3.** Parámetros de los escenarios de simulación.

<b>Característica</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Área geográfica	18.19 Km <sup>2</sup>	16.24 Km <sup>2</sup>
Número de MBS	7	25
Frecuencia de operación	900 MHz	
Servicio implementado	Voz y datos	



Requerimiento de SINR	-20dB y -14dB <sup>6</sup>
Cantidad de UE	300
Ganancia de antena de la MBS	20 dB
Ganancia de antena del UE	0 dB
Potencias de Transmisión	-Inf dBm <sup>7</sup> , -1dBm, 2dBm, 5dBm, 8dBm, 11dBm, 14dBm, 17dBm, 21dBm, 23dBm.
Ancho de banda	3.84 MHz
Potencia de ruido térmico	-101.75 dBm
Figura de ruido	7.4 dB
Índice de tolerancia a interferencia	3 dB

Otro aspecto que se tiene en cuenta es el modelo del canal de transmisión, el cual, para los dos escenarios, se ajusta a un modelo de propagación para exteriores e interiores en un ambiente peatonal, válido para enlaces Sin Línea de Vista (NLOS, *Non Line Of Sight*), el cual describe un canal de propagación en las peores condiciones [25]. El Desvanecimiento por Sombra (SF, *Shadow Fading*), se modela con una variable aleatoria con distribución normal  $D$  que tiene una desviación estándar de 3dB, de modo que las pérdidas de propagación  $L$  quedan representadas por la ecuación 4.1.

$$L = 49 + 40\text{Log}_{10}(R) + 30\text{Log}_{10}(f) + D \quad (4.1)$$

Donde,  $R$  es la distancia entre la MBS y el UE en Kilómetros y  $f$  es la frecuencia portadora dada en MHz.

## 4.2. Resultados y Análisis

Las primeras simulaciones se realizaron con el algoritmo de PC basado en la GT descrito en el capítulo tres. En estos resultados se obtuvieron probabilidades de degradación por encima de 0.5 (Ver apéndice A), esto indica que la capacidad del sistema no superó el 50% en ninguno de los casos de simulación, debido a que el algoritmo propuesto inicialmente, no controló el nivel de interferencia intercelda del sistema, ya que fue diseñado en [15] para ser implementado en una sola celda de un sistema multicelular, donde los demás UE asociados a otras celdas transmitían con una potencia constante, por lo que la interferencia intercelda generada fue también constante en todo instante de tiempo. Por tanto la implementación de este algoritmo en todas las celdas de un sistema multicelular, en donde todos los UE

<sup>6</sup> En sistemas limitados por interferencia con portadora única, los valores de SINR son menores que cero, debido a la interferencia generada por los UE que mantienen comunicaciones activas.

<sup>7</sup> Corresponde a un valor de potencia igual a 0 watts.



cambian sus estrategias en cada instante de tiempo en función de la interferencia presente en el sistema, no permitió obtener una capacidad favorable. Por tal razón fue necesario realizar una adaptación de este algoritmo. La tabla 4, presenta la comparación entre el algoritmo propuesto inicialmente y la adaptación del mismo.

**Tabla 4.** Comparación entre el algoritmo propuesto y la adaptación realizada.

Característica	Algoritmo de PC	
	Propuesto inicialmente	Adaptación realizada
Tipo de sistema	Multicelular homogéneo	Multicelular homogéneo
Número de celdas en las que se implementa el modelo	$\geq 1$	$\geq 1$
Potencia Mínima de transmisión	-Inf dBm	-15 dBm
Potencia Máxima de transmisión	23 dBm	33 dBm <sup>8</sup>
Tamaño del salto entre potencias de transmisión	3 dB	4 dB
Niveles de Potencias de transmisión	10	13
LR	$\frac{1}{1+t}$	$\frac{1}{x + visitas(t, u_n)}$

El cambio más significativo se realizó en la LR, donde el término  $visitas(t, u_n)$  corresponde al número total de veces que la acción  $u_n$  ha sido escogida por el  $UE_n$  hasta el instante  $t$  y  $x$  es una variable que inicialmente toma el valor de 1 [27], sin embargo, después de realizar pruebas variando el valor de  $x$  se evidenció un aumento en la cantidad de UE satisfechos si, el valor de  $x$  es igual a 1 cuando la utilidad obtenida supera el umbral establecido por el índice de tolerancia a interferencia y el valor de  $x$  es igual a 5, cuando la utilidad obtenida está dentro de los límites establecidos por el requerimiento de SINR y el índice de tolerancia a interferencia o, cuando la utilidad obtenida está por debajo del requerimiento de SINR establecido para el servicio (Ver apéndice B).

A continuación se presentan los resultados obtenidos al implementar el algoritmo de PC adaptado en el presente trabajo de grado en los dos escenarios de simulación. En cada caso de simulación, se ejecutó durante 1000 iteraciones el algoritmo de PC. Además se realizaron 1000 simulaciones, cuyos resultados están consignados en el apéndice C, con el fin de obtener los resultados más probables. Cada caso de simulación muestra el siguiente orden: UE conectados y desconectados del sistema, tabla con los resultados obtenidos en cada celda del sistema, gráficas de la variación de probabilidad de potencias y de SINR para

<sup>8</sup> Potencia máxima de un UE cumpliendo con la Tasa de Absorción Específica (SAR, *Specific Absorption Rate*) establecida para un equipo de categoría 4 en 900Mhz.



diferentes UE ubicados a diferentes distancias de sus MBS, resultados obtenidos al implementar IPC, comparación de la capacidad obtenida al implementar el algoritmo de PC basado en GT en la celda del centro y de la obtenida en una única celda al implementar el algoritmo de PC propuesto en [15].

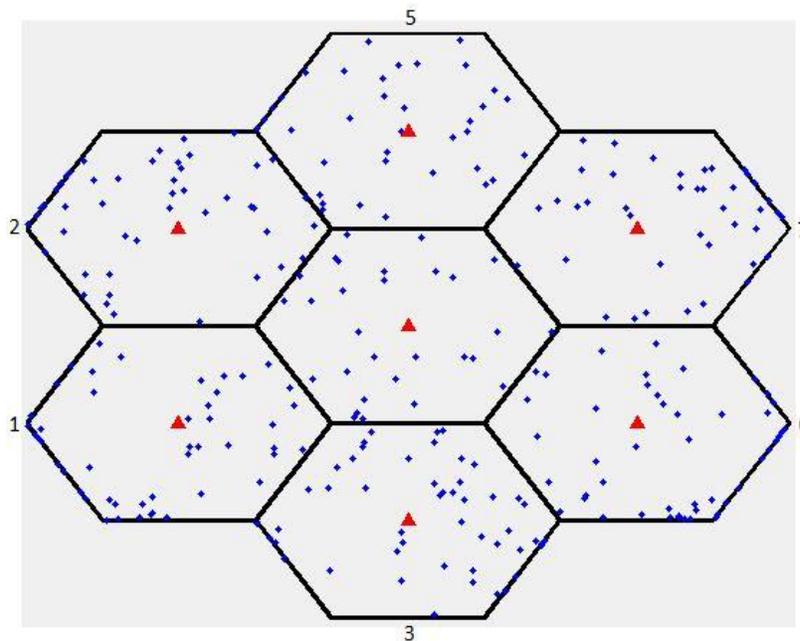
En la tabla 5 se presenta la convención utilizada para la presentación de los resultados.

**Tabla 5.** Convención utilizada en las pruebas.

Símbolo	Representación
Triángulos rojos	MBS del sistema
Puntos azules	UE presentes en el sistema
Puntos verdes	UE conectados a voz
Puntos rojos	UE conectados a datos
Puntos negros	UE no conectados
Círculos azules	Radio de cobertura alcanzado por cada MBS

### 4.2.1. Escenario 1: 1Km

La figura 4.3 muestra el primer escenario de simulación, en el cual, el radio de las 7 celdas del sistema multicelular es igual a 1 Km con una densidad de usuarios por celda de aproximadamente 43. Los números corresponden a los índices que identifican las celdas de los bordes.



**Figura 4.3.** Escenario de simulación 1.



## Caso 1: Voz

Se estableció un requerimiento de SINR igual a  $-20\text{dB}$  para todos los UE. La figura 4.4 muestra el resultado obtenido.

La tabla 6 consigna los resultados de cada una de las celdas. Se observa que de un total de 300 UE se conectaron 271, lo que corresponde al 90.33% de los UE presentes en el sistema. La celda con mayor porcentaje de UE conectados fue la celda 4, con un 97.29%, mientras que la celda con el menor porcentaje fue la celda 2, con un 69.09%. Se aprecia que al implementar el algoritmo de PC basado en GT en todas las celdas del sistema, el número de UE conectados por celda superó el 65%.

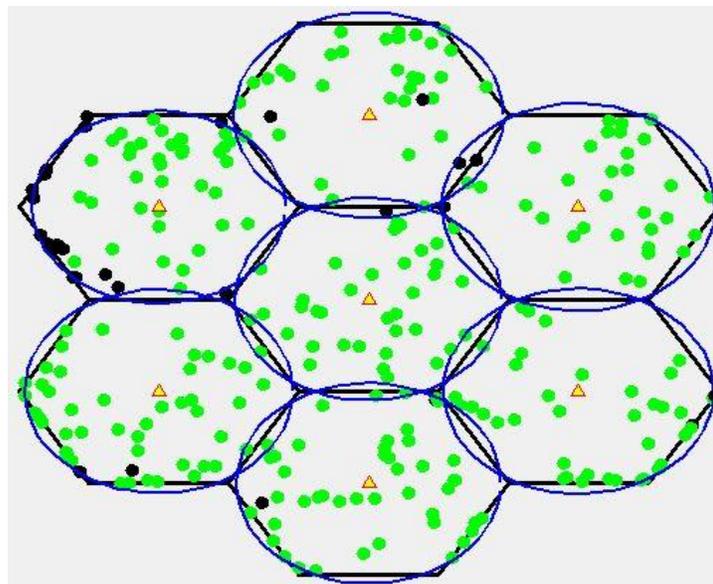


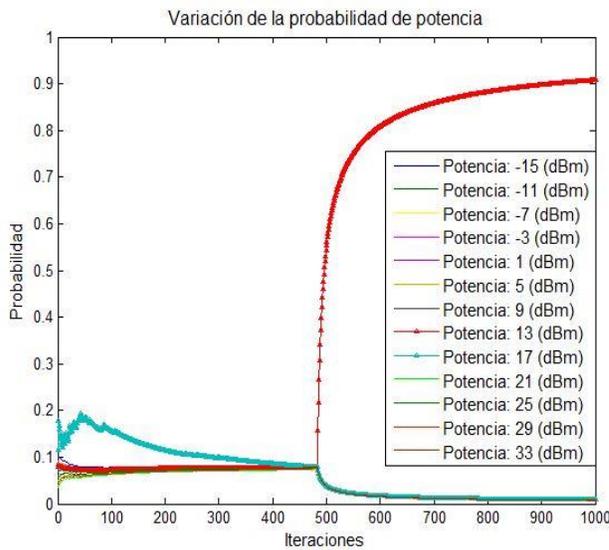
Figura 4.4. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz.

Tabla 6. Resultados obtenidos por celda, escenario 1 – voz.

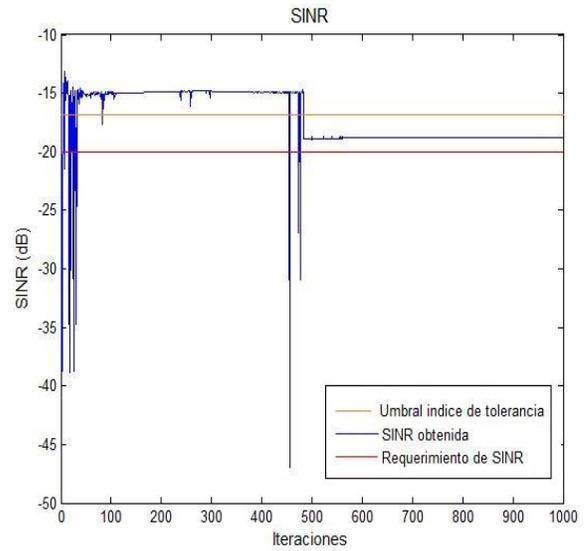
Celda	Radio (Km)	Total UE	Total UE (%)	UE Conect.	Conect. (%)	UE No Conect.	No Conect. (%)
1	0.958	49	16.3333	47	95.91	2	4.08
2	0.905	55	18.3333	38	69.09	17	30.90
3	0.944	47	15.6667	45	95.74	2	4.25
4	0.951	37	12.3333	36	97.29	1	2.70
5	0.965	34	11.3333	31	91.17	3	8.82
6	0.966	42	14	40	95.23	2	4.76
7	0.976	36	12	34	94.44	2	5.55
<b>Total</b>	---	300	100	271	---	29	---



La figura 4.5.a muestra la variación de la probabilidad de potencia de un UE conectado que se encuentra a 545 metros de la MBS, el cual inició su transmisión con una potencia de 17dBm, sin embargo se observa en la figura 4.5.b que la utilidad obtenida superó el índice de tolerancia a interferencia del sistema, por lo que el algoritmo realizó una actualización de las probabilidades de las potencias, razón por la cual la probabilidad de la potencia de 17dBm disminuyó a medida que aumentó la probabilidad de las demás, hasta que en la iteración 483, el algoritmo asignó al UE una potencia de 13dBm, con la que obtuvo una utilidad que se mantuvo dentro del rango establecido, como se observa en la curva de SINR. Debido a esto, el UE identifica esta potencia como la más adecuada, generando un aumento paulatino de su probabilidad y una disminución de las demás.



a. Variación de la probabilidad de potencia.



b. Curva de SINR.

**Figura 4.5.** Resultados de un UE a 545m de la MBS.

En la figura 4.6.a se observa la gráfica de variación de la probabilidad de potencia obtenida para un UE que no se conectó al sistema debido a que las condiciones de interferencia no permitieron que seleccionara una potencia de transmisión con la que obtuviera una utilidad por encima del requerimiento de SINR. Además se observa que las probabilidades de las potencias convergen hacia el mismo valor, esto causó que el algoritmo asignara al UE potencias de transmisión que se mantuvieron durante pequeños intervalos de tiempo, como se observa en la figura 4.6.b, manteniendo al UE desconectado durante toda la simulación.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

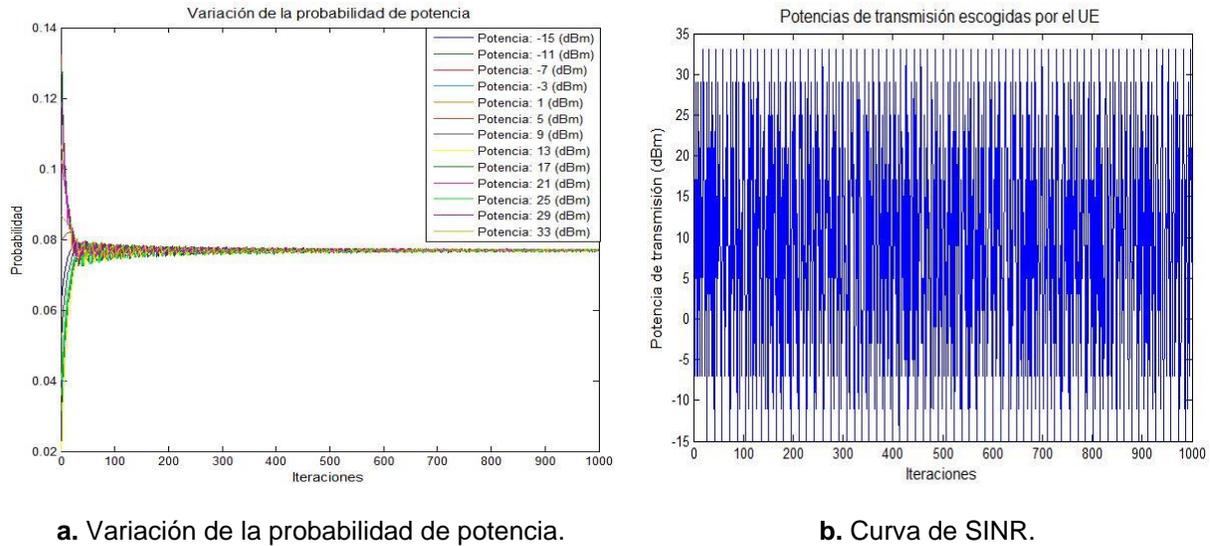


Figura 4.6. Resultados de un UE no conectado.

En las figuras 4.7.a y 4.7.b se observa la variación de la probabilidad de potencia de dos UE conectados que se encuentran a 967 y 94 metros de la MBS, respectivamente. En estas figuras se aprecia que el UE que se encuentra más lejos de la MBS necesitó una potencia de transmisión de 29dBm para conectarse al sistema, muy superior a la potencia que requirió el UE ubicado más cerca de la MBS, la cual fue de -11dBm. Este resultado evidencia que el algoritmo de PC basado en la GT asigna dinámicamente las potencias de transmisión en función de la distancia a la que se encuentran los UE, de manera que los más cercanos a su MBS transmitan con menor potencia que los UE que se encuentran a una mayor distancia.

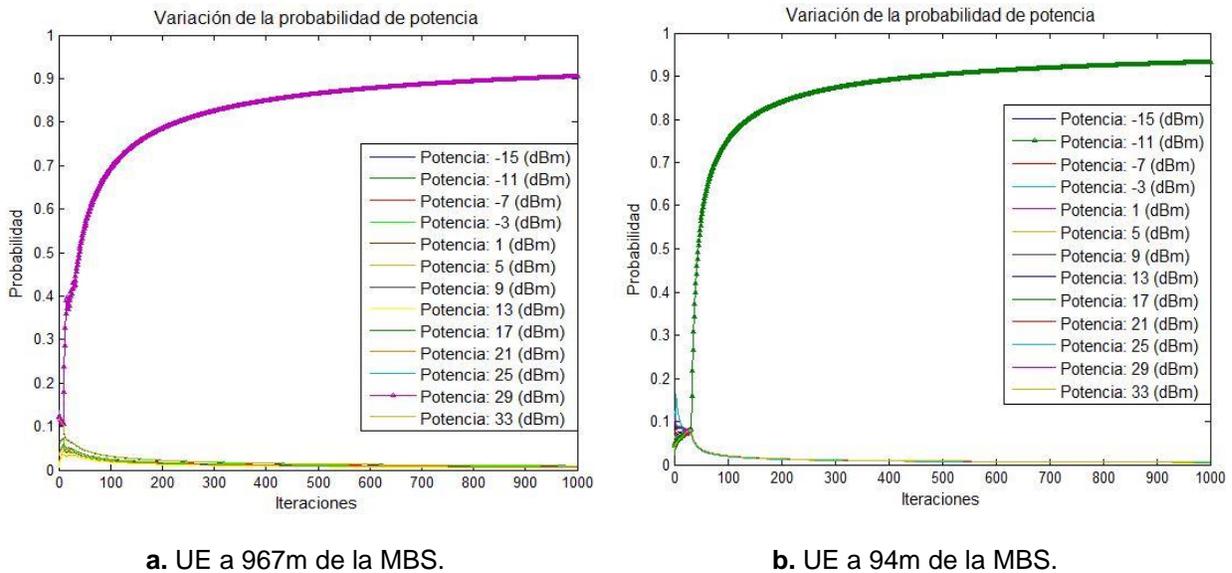
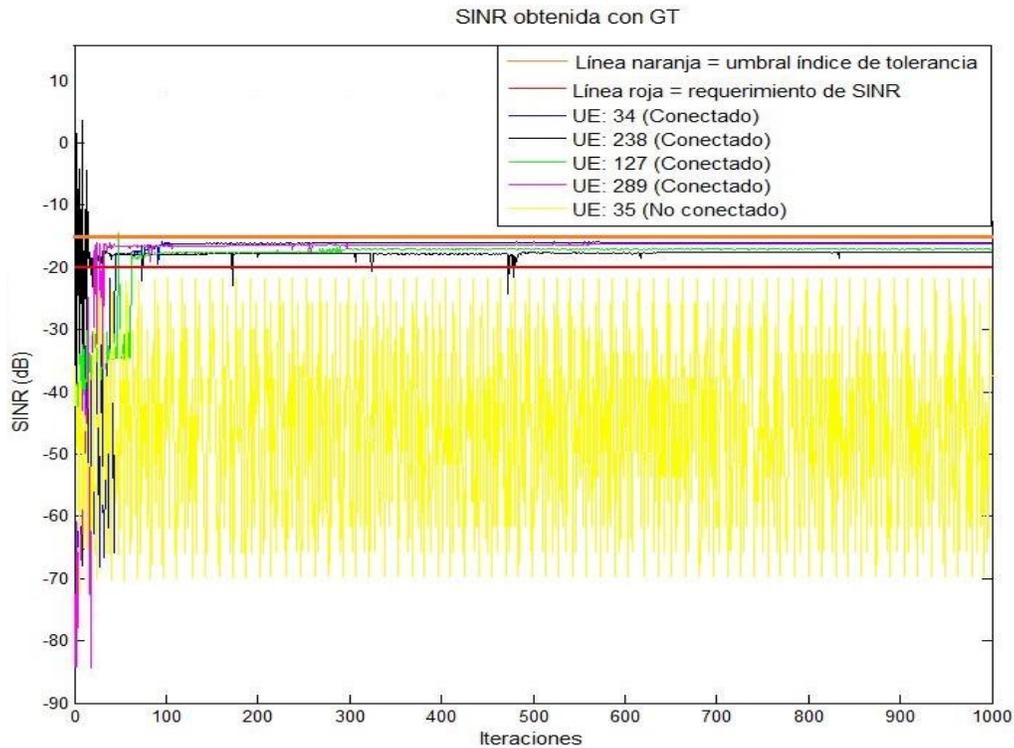


Figura 4.7. Variación de la probabilidad de potencia.



La figura 4.8 muestra la variación de la SINR de cinco UE, de los cuales cuatro se conectaron al sistema y uno no se conectó. Se aprecia que las SINR de los UE conectados, durante las primeras iteraciones variaron en un rango pequeño debido a las condiciones iniciales del sistema de comunicaciones, sin embargo, cuando los UE empezaron a aprender cual estrategia les generó la mejor utilidad, la SINR de cada uno, alcanzó el umbral establecido para el servicio de voz y se mantuvo en este valor. Por otra parte, se observa que la SINR del UE no conectado, varió en un rango entre -70 y -21 dB. Estas fluctuaciones se mantuvieron durante toda la simulación debido a que el UE no consiguió encontrar una potencia óptima de transmisión que le generara una utilidad adecuada.



**Figura 4.8.** Variación de la SINR de cinco UE.

El resultado obtenido al implementar IPC sobre este caso de simulación se observa en la figura 4.9, donde el sistema atendió 137 de los 300 UE presentes en el sistema, lo que corresponde a una capacidad del 45.66%. Al comparar este resultado con el obtenido al aplicar el algoritmo de PC basado en GT, se observa que con el algoritmo de GT la capacidad del sistema aumentó 44.66%, en comparación con la capacidad obtenida con IPC. Por otra parte, se observa que los radios de cobertura alcanzados por 6 MBS fueron cercanos a 1Km, sin embargo, se aprecia que el radio de cobertura de la MBS restante fue de tan solo 85m, esto se debe a que IPC no consiguió disminuir el nivel de interferencia de todas las celdas.

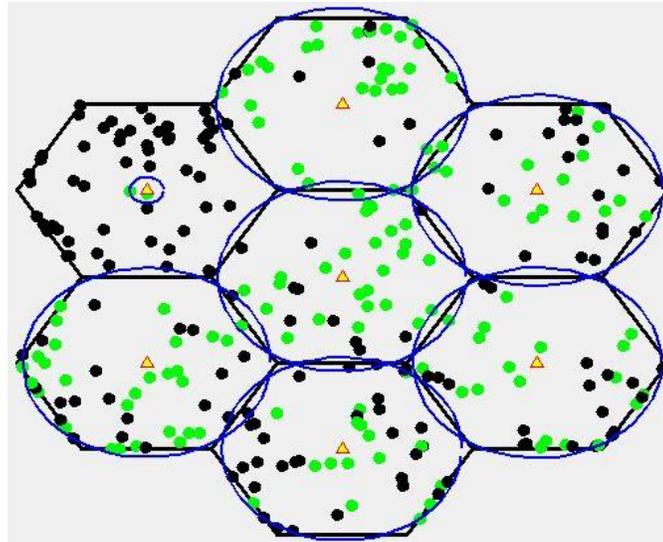


Figura 4.9. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz.

Las curvas de probabilidad de degradación obtenidas con GT e IPC se aprecian en la figura 4.10. Para GT, la curva de probabilidad de degradación cayó rápidamente, alcanzando un valor de aproximadamente 0.09, mientras que con IPC la curva se mantuvo constante la mayor parte del tiempo en un valor de 0.51. Este resultado evidencia que el algoritmo de PC basado en GT permitió mejorar la capacidad del sistema en cada iteración, a diferencia del algoritmo de IPC cuyo resultado sólo varió durante las cinco primeras iteraciones.

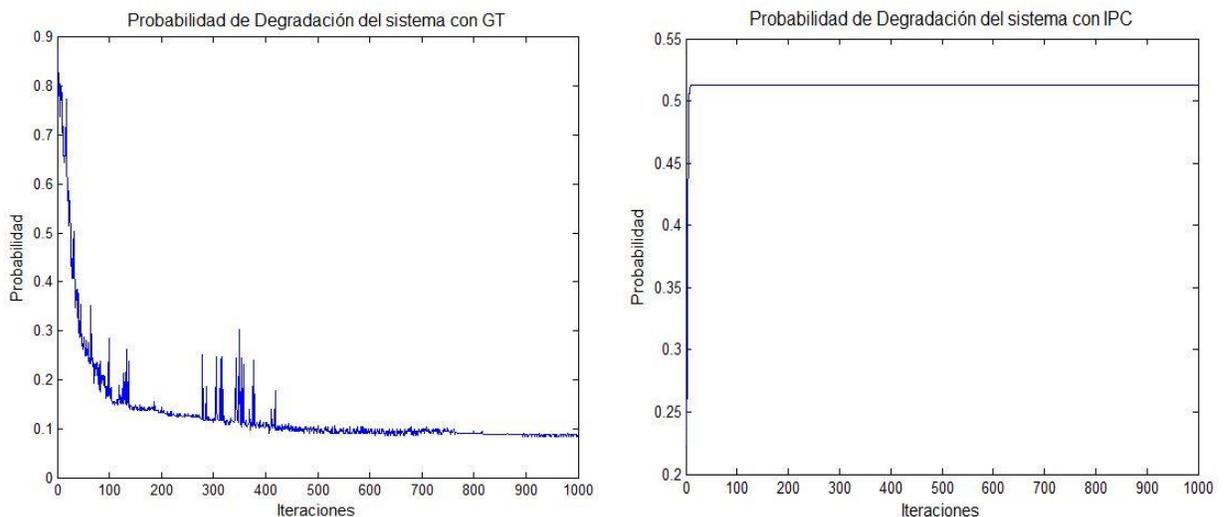
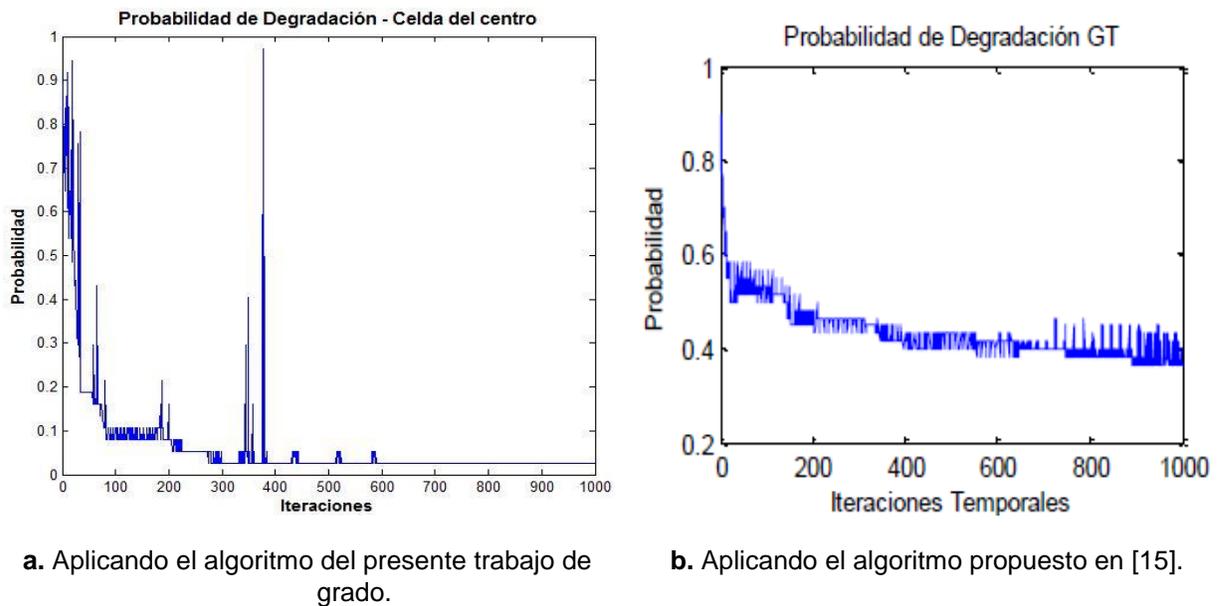


Figura 4.10. Probabilidad de degradación con GT e IPC.



La probabilidad de degradación obtenida en la celda del centro del sistema multicelular de este trabajo de grado se muestra en la figura 4.11.a y en la figura 4.11.b, se muestra la probabilidad de degradación obtenida en la celda de radio de 1Km para el servicio de voz, del trabajo de maestría [15]. Al comparar estas curvas se evidencia que ambas presentan un comportamiento decreciente, sin embargo, la curva de la figura 4.11.a decrece de manera más rápida que la curva de la figura 4.11.b, alcanzando un valor mínimo de 0.03, esto se debe a que el algoritmo de PC es implementado en todas las celdas lo que reduce la interferencia del sistema, particularmente en la celda del centro.



**Figura 4.11.** Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.

## Caso 2: Datos

En este caso, la red ofreció el servicio de datos, por lo que se incrementó el requerimiento de SINR a -14dB. En la figura 4.12 se observa el resultado obtenido. Se nota que, en este caso, el radio de cobertura de cada MBS disminuyó notablemente, en comparación con los radios obtenidos en el caso 1.

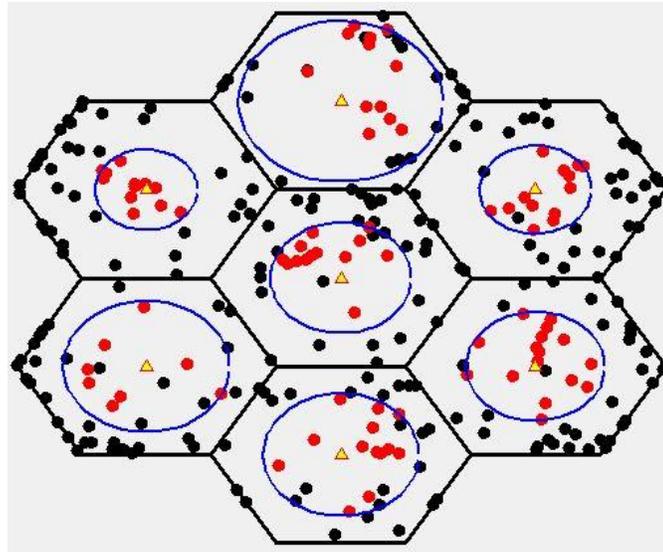


Figura 4.12. Resultado obtenido con GT, escenario1 – datos.

La tabla 7 muestra los resultados obtenidos en cada una de las celdas, donde de un total de 300 UE, se conectaron 87, lo que corresponde a una capacidad del 29%. Se aprecia que al aumentar el requerimiento de SINR la capacidad del sistema disminuyó sustancialmente, en comparación con la capacidad obtenida en el caso 1. El radio promedio de cobertura de las celdas fue de 561m, esto indica que para mejorar la capacidad del sistema es necesario disminuir el radio de las celdas.

Tabla 7. Resultados obtenidos por celda, escenario 1 – datos.

Celda	Radio (Km)	Total UE	Total UE (%)	UE Conect.	Conect. (%)	UE No Conect.	No Conect. (%)
1	0.641	43	14.3333	8	18.60	35	81.39
2	0.395	48	16	12	25	36	75
3	0.600	38	12.6667	13	34.21	25	65.78
4	0.541	42	14	13	30.95	29	69.04
5	0.788	34	11.3333	12	35.29	22	64.70
6	0.534	48	16	16	33.33	32	66.66
7	0.432	47	15.6667	13	27.65	34	72.34
<b>Total</b>	---	300	100	87	---	213	---

Los resultados obtenidos para un UE conectado que se encuentra a 516m de su MSB, son mostrados en la figura 4.13. La variación de la probabilidad de potencia mostrada en la figura 4.13.a evidencia que durante las primeras 187 iteraciones, la potencia de transmisión con



mayor probabilidad fue la de 25dBm. La probabilidad de esta potencia disminuyó debido a que la utilidad obtenida por el UE no superó el umbral establecido para el servicio de datos, como se observa en la figura 4.13.b. En la iteración 200, el algoritmo asignó al UE una potencia de transmisión de 33dBm, con la cual obtuvo una utilidad que superó el requerimiento y se mantuvo por debajo del límite establecido por el índice de tolerancia, por esta razón el UE aprendió que esta estrategia era adecuada para satisfacer su requerimiento de SINR, lo que implicó un aumento de su probabilidad y una disminución de las probabilidades de las demás potencias.

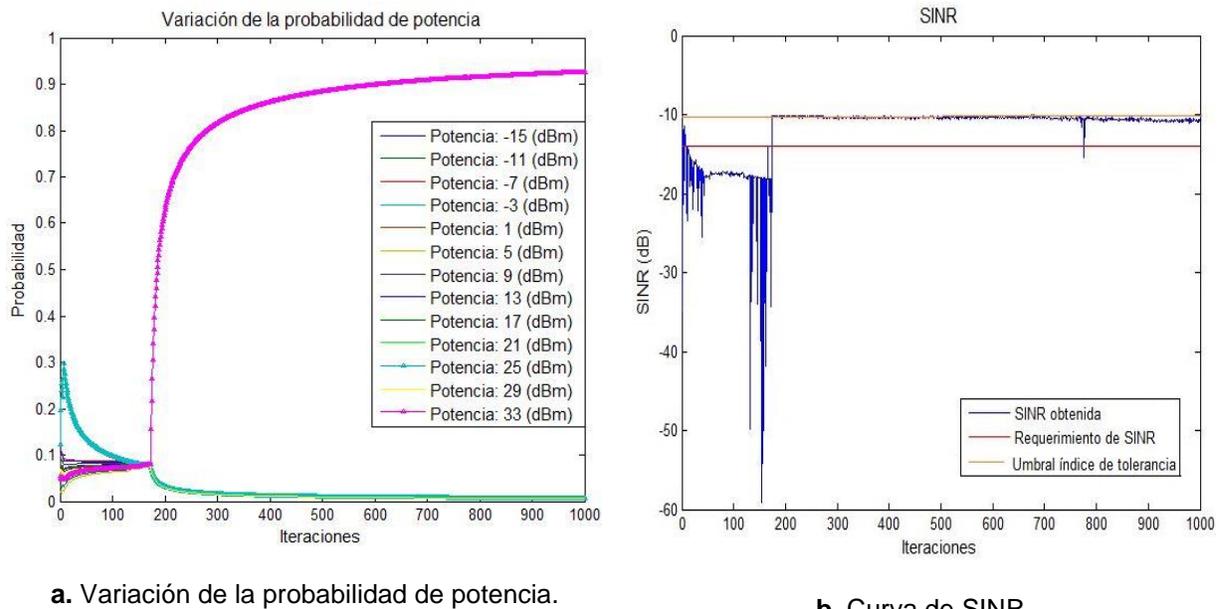
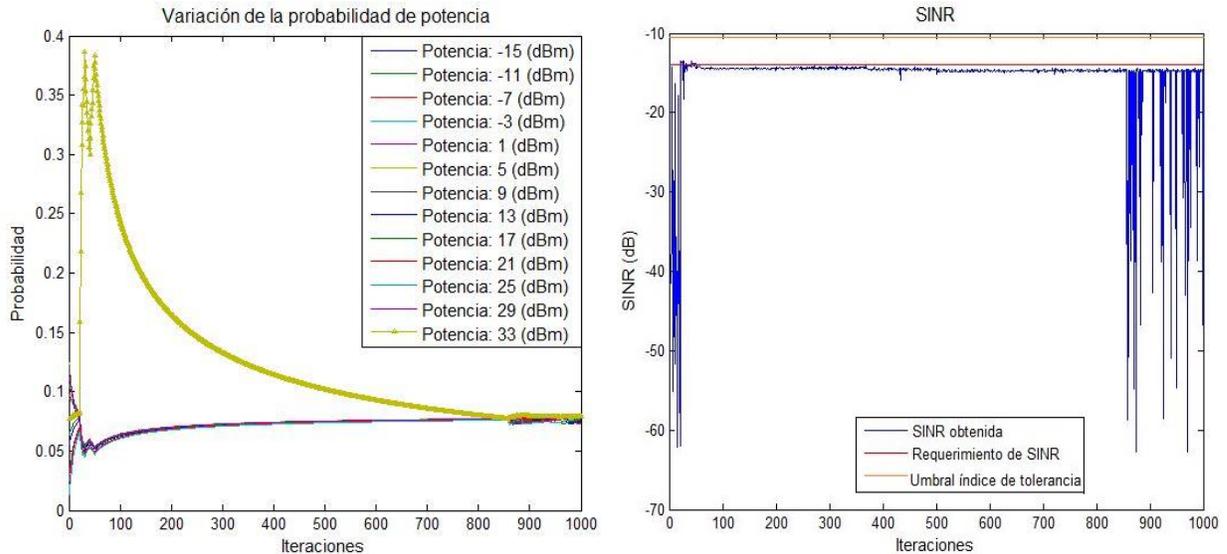


Figura 4.13. Resultado de un UE a 516m de la MBS.

La figura 4.14.a muestra la gráfica de variación de la probabilidad de potencia obtenida para un UE que no se conectó al sistema debido a la condición de interferencia presente en el mismo. La curva de SINR, la cual se muestra en la figura 4.14.b, evidencia que durante las primeras iteraciones el UE estuvo conectado al sistema transmitiendo con una potencia de 33dBm, pero debido a las variaciones del canal de transmisión, la SINR disminuyó de manera que el UE quedó desconectado del sistema, por tanto el algoritmo de PC redujo rápidamente la probabilidad de esta potencia y aumentó las demás, con el fin de encontrar una potencia con la cual el UE pudiera conectarse nuevamente al sistema, sin embargo, como se observa en la figura 4.14.a, a partir de la iteración 867, las probabilidades de las potencias convergieron hacia el mismo valor, lo que causó que el algoritmo asignara al UE



potencias de transmisión que se mantuvieron durante pequeños intervalos de tiempo, dejando al UE desconectado del sistema.



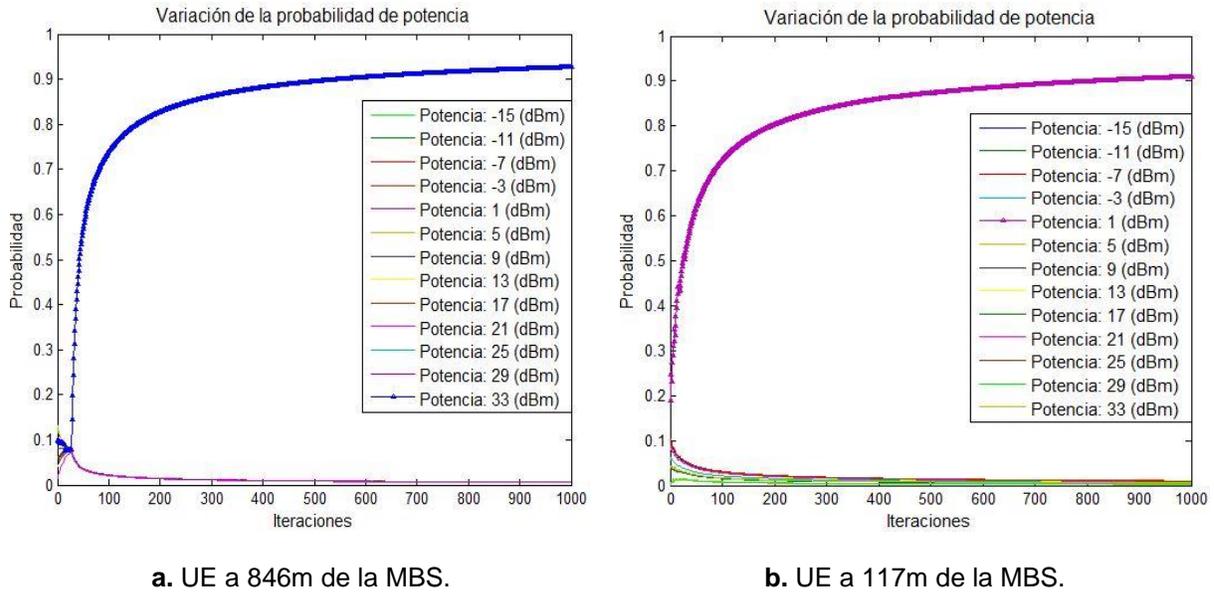
a. Variación de la probabilidad de potencia.

b. Curva de SINR.

**Figura 4.14.** Resultado de un UE no conectado.

La variación de la probabilidad de potencia de un UE que se encuentra a 846 y de otro a 117 metros de la MBS, se muestran en las figuras 4.15.a y 4.15.b, respectivamente. Al comparar estas figuras, se observa que, al igual que en el caso 1, el UE que se encuentra más cerca de la MBS necesitó una menor potencia (1dBm) para conectarse al sistema que el UE más lejano (33dBm), lo que indica que el algoritmo evita un consumo innecesario de la potencia de transmisión por parte de los UE que se encuentra cerca de su MBS.

Haciendo una comparación entre la figura 4.15.b y la figura que muestra la variación de probabilidad de un UE que se encuentra a 94 metros de la MBS obtenida en el caso 1, se nota que a pesar de que ambos UE se encuentran cerca de la MBS, el UE que accedió al servicio de voz requirió una potencia de -11dBm mientras que el UE que accedió al servicio de datos necesitó una potencia de 1dBm, esto evidencia que el requerimiento de SINR del servicio al que un UE desea acceder tiene una relación directa con la potencia de transmisión del mismo, razón por la cual, para este caso de simulación, el nivel de interferencia del sistema aumentó, disminuyendo considerablemente la capacidad del sistema en comparación con la capacidad obtenida en el caso 1.



**Figura 4.15.** Variación de la probabilidad de potencia.

En la figura 4.16 se observa el resultado de la SINR obtenida para cinco UE, tres de ellos conectados y dos no conectados. Se puede notar que durante las primeras iteraciones las SINR de los UE conectados experimentaron grandes fluctuaciones, pero dos de ellas lograron converger a un valor por encima del umbral establecido para el servicio de datos en un periodo de tiempo muy corto, mientras que la SINR del otro UE se mantuvo en un valor por debajo del umbral hasta que finalmente en la iteración 973, alcanzó una SINR superior al requerimiento por lo que consiguió conectarse al sistema. Las SINR obtenidas por los UE que no se conectaron al sistema, inicialmente se mantuvieron estables en valores por debajo del umbral, sin embargo, debido a la interferencia existente en el sistema y a los cambios de potencia que tuvo el UE 216, su SINR empezó a variar entre -65 y -16 dB mientras que la SINR del otro UE no conectado, se conservó constante en el mismo valor manteniendo al UE desconectado.

El resultado obtenido al aplicar IPC sobre este caso de simulación, se observa en la figura 4.17, donde ningún UE de los 300 presentes en el sistema logró conectarse. Al comparar este resultado con el obtenido al aplicar el algoritmo de PC basado en la GT, se observa que la capacidad del sistema aumentó 29% cuando se implementó GT como mecanismo de PC, debido a que este algoritmo consiguió reducir el nivel de interferencia del sistema en comparación con el algoritmo de IPC.

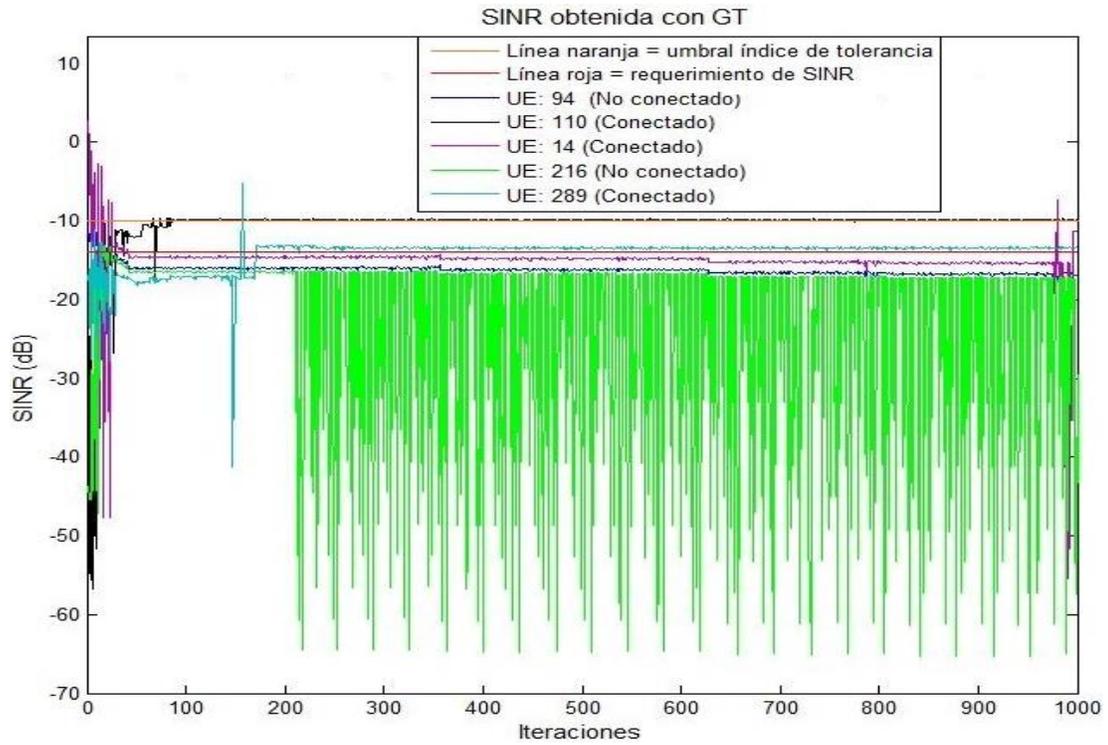


Figura 4.16. Variación de la SINR de cinco UE.

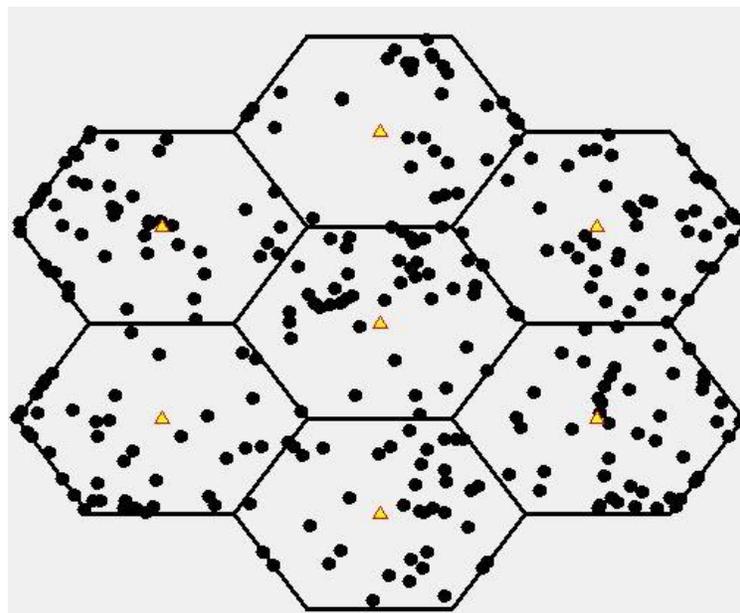
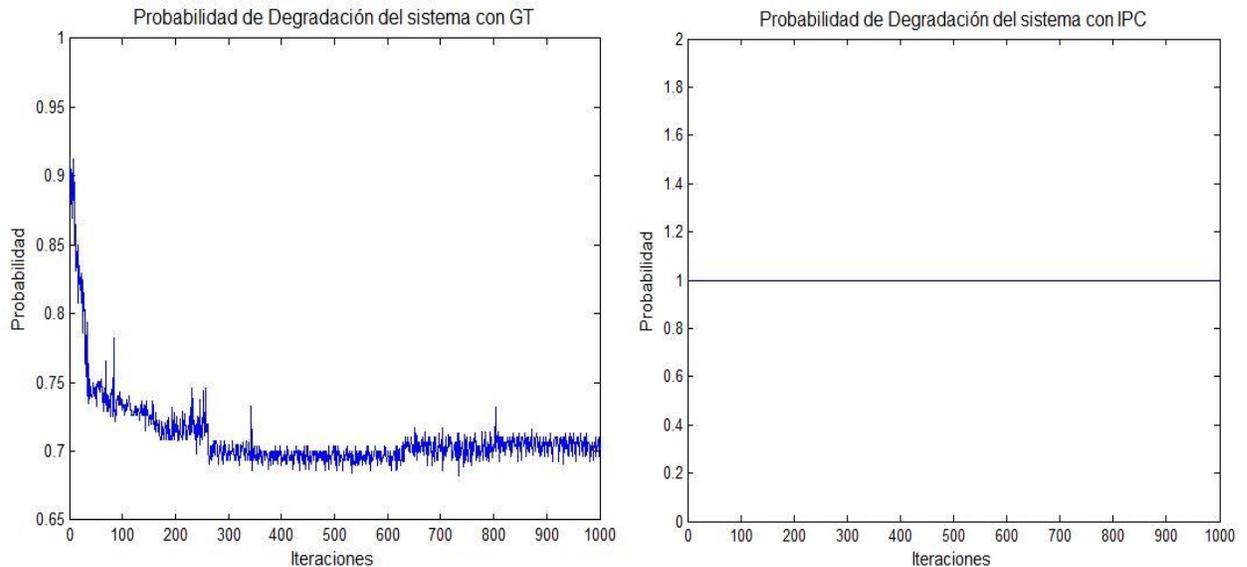


Figura 4.17. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – datos.

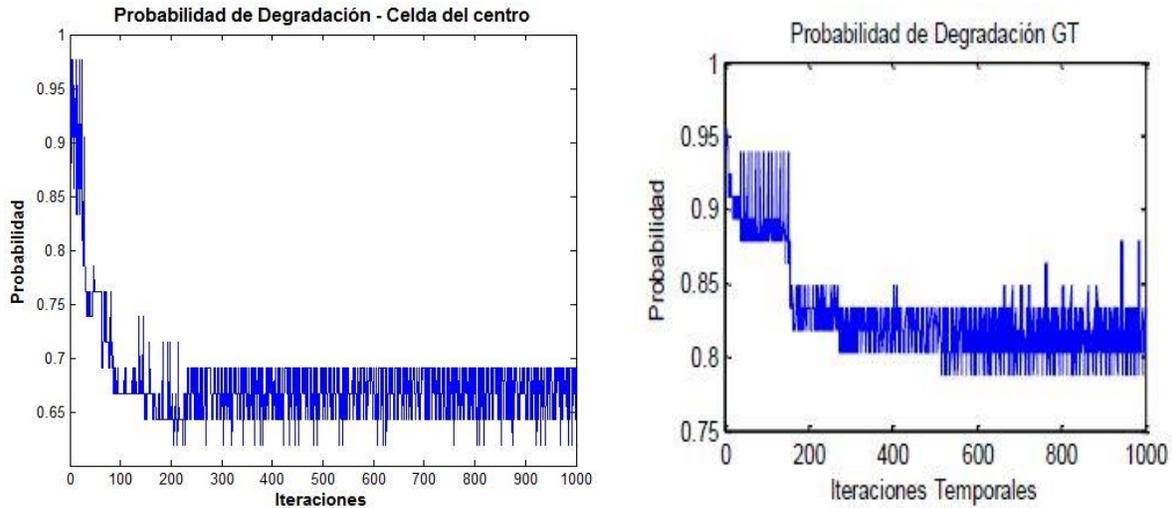


Las curvas de probabilidad de degradación del sistema obtenidas al aplicar los algoritmos de GT e IPC se observan en la figura 4.18. Al hacer la comparación entre la curva de probabilidad de degradación obtenida con GT en este caso y la curva de probabilidad de degradación con GT obtenida en el caso anterior, se evidencia un deterioro en la capacidad del sistema, sin embargo, para este caso de simulación, se observa que el algoritmo de GT proporcionó un aumento en la capacidad del sistema en relación con el algoritmo de IPC.



**Figura 4.18.** Probabilidad de degradación con GT e IPC.

En la figura 4.19.a se observa la probabilidad de degradación de la celda del centro del sistema multicelular del presente trabajo y en la figura 4.19.b la probabilidad de degradación obtenida en la celda de radio de 1Km que implementa el servicio de datos, del trabajo de maestría [15]. Al comparar estas dos curvas se evidencia que la curva de la figura 4.19.a decrece más rápido y se mantiene en valores cercanos a 0.65, mientras que la otra, decrece de manera lenta y tan solo alcanza un mínimo de aproximadamente 0.8.



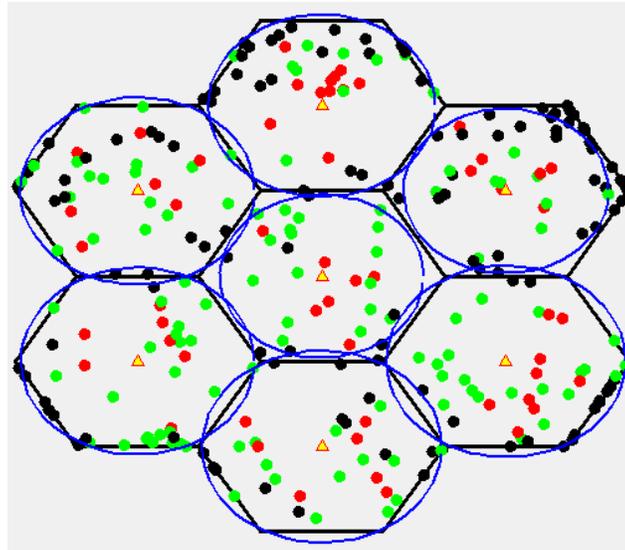
a. Aplicando el algoritmo del presente trabajo de grado.

b. Aplicando el algoritmo propuesto en [15].

**Figura 4.19.** Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.

### Caso 3: Voz y Datos

En este caso de simulación el sistema ofreció los servicios de voz y datos simultáneamente, de manera que a cada UE se le asignó de forma aleatoria un requerimiento de SINR, -20dB para voz o -14dB para datos. En la figura 4.20 se observa el resultado obtenido. El total de UE conectados fue de 171, de los cuales, 116 se conectaron con voz y 55 con datos. Los radios de cobertura alcanzados por las MBS del sistema variaron entre 827m y 973m, lo cual significa una mejora en la cobertura alcanzada en comparación con la obtenida en el caso 2, esto se debe a que, a diferencia del caso 2, en este caso de simulación hay UE que acceden al servicio de voz, los cuales al implementar el algoritmo de PC basado en la GT no utilizan altas potencias de transmisión por tanto no generan un alto nivel de interferencia.



**Figura 4.20.** Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz y datos.

Los resultados obtenidos en cada celda del sistema se consignan en la tabla 8. Se observa que el número total de UE conectados es igual a 171 lo que corresponde a una capacidad del 57%. La capacidad obtenida en este caso disminuyó 33.33% en comparación con la capacidad obtenida en el caso 1, mientras que aumentó 28% en comparación con la obtenida en el caso 2.

**Tabla 8.** Resultados obtenidos por celda, escenario 1 – voz y datos.

Celda	Radio (Km)	Total UE	Total UE (%)	UE Conect.	Conect. (%)	UE No Conect.	No Conect. (%)
1	0.949	42	14	31	73.80	11	26.19
2	0.951	44	14.6667	26	59.09	18	40.90
3	0.975	35	11.6667	21	60	14	40
4	0.827	32	10.6667	24	75	8	25
5	0.924	43	14.3333	21	48.83	22	51.16
6	0.973	47	15.6667	31	65.95	16	34.04
7	0.834	57	19	17	29.82	40	70.17
<b>Total</b>	---	300	100	171	---	129	---

Las figuras 4.21.a y 4.21.b muestran la variación de la probabilidad de potencia de un UE que se encuentra a 520m de la MBS y accede al servicio de voz y de un UE que está ubicado a 531m de la MBS y accede al servicio de datos, respectivamente. Comparando ambas figuras se observa que a pesar de que los dos UE se encuentran aproximadamente a la misma distancia de la MBS, el UE que accedió al servicio de voz requirió una potencia de transmisión de 21dBm, bastante menor que la potencia utilizada por el UE que accedió al servicio de datos, la cual fue de 33dBm.

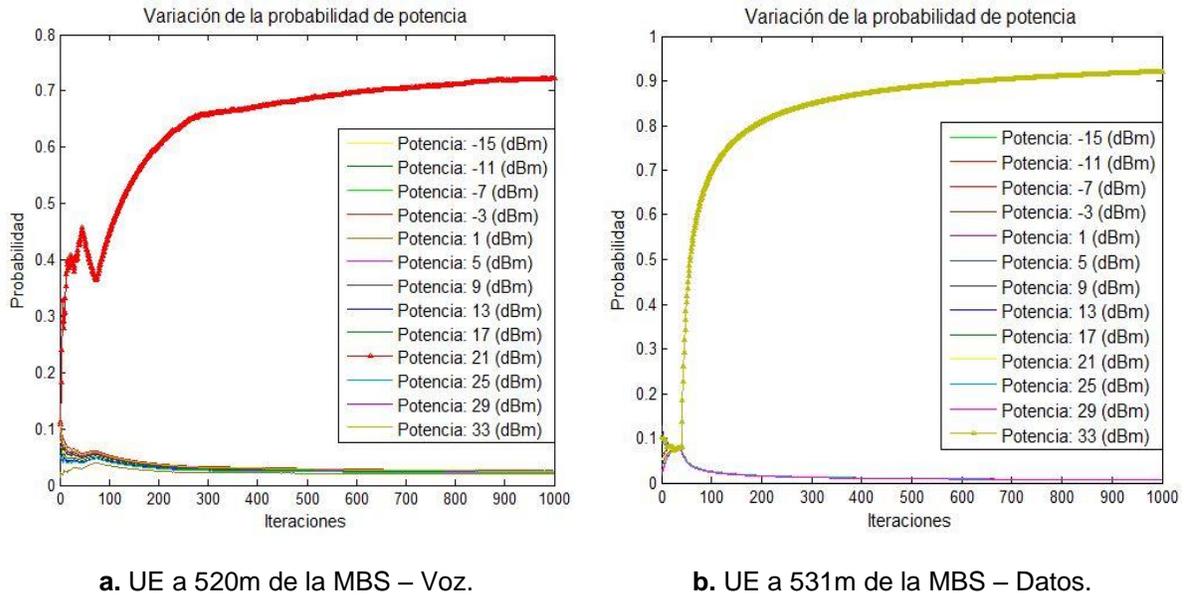


Figura 4.21. Variación de la probabilidad degradación.

Al igual que en los casos 1 y 2, se analizan las curvas de variación de la probabilidad de potencia de dos UE, uno ubicado a 987m y el otro a 112m de su MBS, las cuales se aprecian en las figuras 4.22.a y 4.22.b, respectivamente, donde se observa que el UE más cercano requirió una menor potencia de transmisión para conectarse al sistema que el UE más lejano. Esto indica que para este escenario, el algoritmo de PC basado en GT, independientemente del servicio al cual desea acceder el UE, permite un consumo eficiente de su batería, ya que garantiza que este transmita con la menor potencia posible.

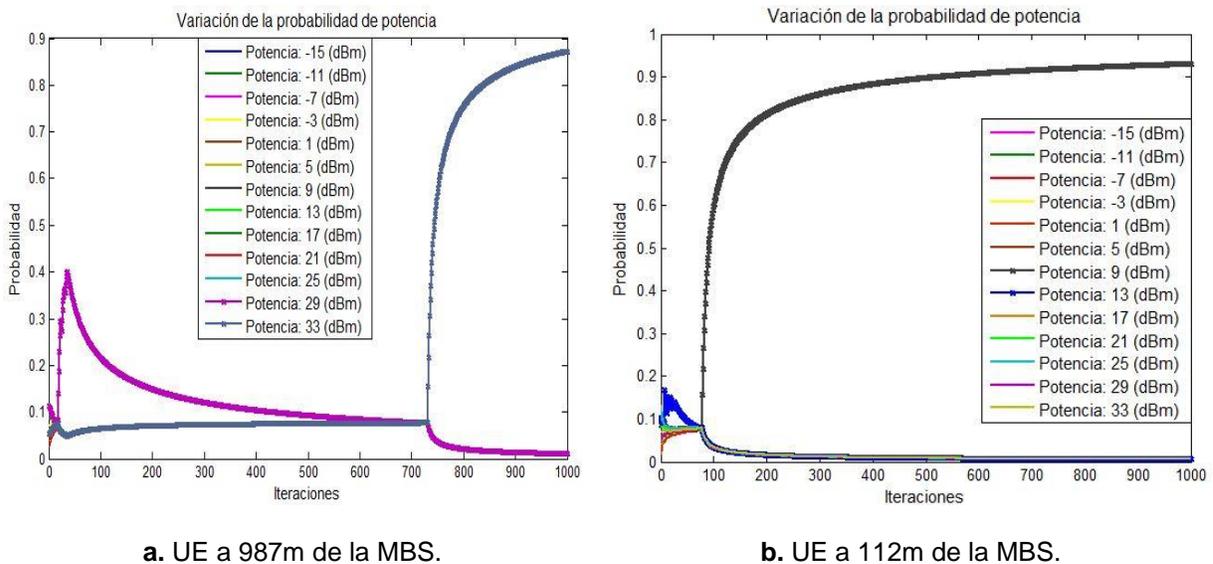
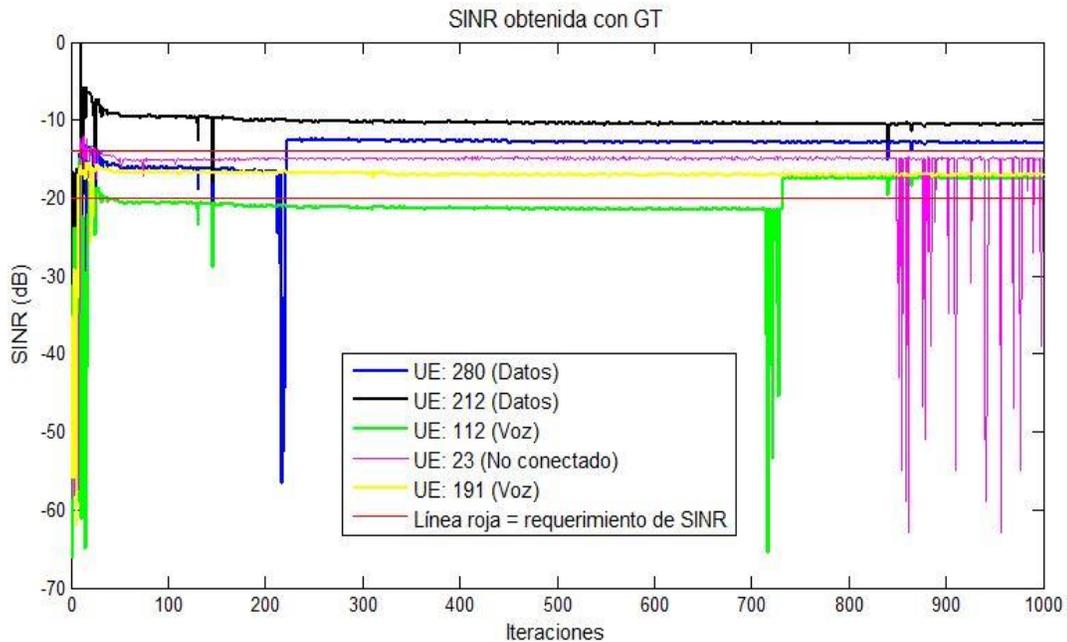


Figura 4.22. Variación de la probabilidad de potencia.



La SINR obtenida por cinco UE, de los cuales dos se conectaron con datos, dos se conectaron con voz y uno no se conectó al servicio solicitado, se observa en la figura 4.23, donde se aprecia como el algoritmo de PC basado en GT estabilizó las curvas de SINR de los cuatro UE conectados, en un valor por encima del requerimiento requerido por cada UE, después de la iteración 735. En el caso del UE no conectado, cuyo requerimiento de SINR fue de -14dB, se aprecia que hasta la iteración 854, la SINR obtenida se mantuvo constante en un valor por debajo de su requerimiento, después de esta iteración, su SINR empezó a variar en un rango entre -65dB y -13dB, debido a que no le fue posible encontrar una potencia de transmisión que le permitiera conectarse al sistema.



**Figura 4.23.** Variación de la SINR de cinco UE.

En la figura 4.24 se observa que aplicar IPC sobre el mismo caso de simulación no generó buenos resultados en comparación con los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de PC basado en GT, ya que de 300 UE se conectaron con voz 38 y con datos 27, dando un total de 65 UE conectados, lo que corresponde a una capacidad del 21.66%. En otras palabras, el porcentaje de UE conectados disminuyó 35.34%, produciendo un deterioro en la capacidad del sistema, lo cual se evidencia en la figura 4.25, donde se aprecia que la probabilidad de degradación del sistema obtenida al aplicar GT decrece rápidamente hasta estabilizarse en un valor por debajo de 0.45, mientras que con IPC la curva de probabilidad de degradación se mantiene constante en un valor igual a 0.6.

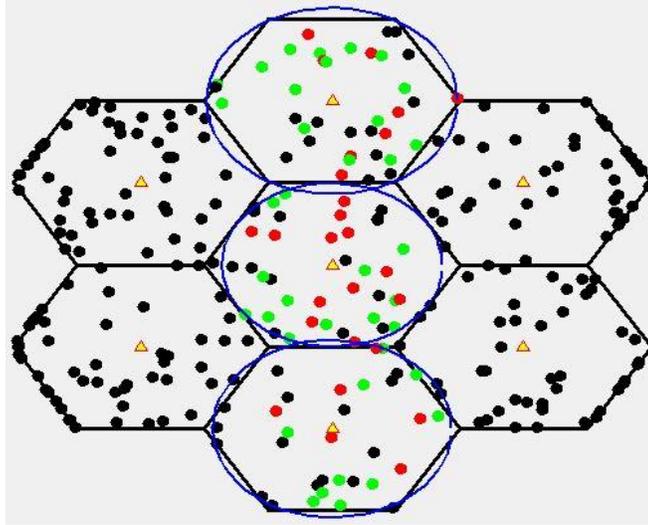


Figura 4.24. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz y datos.

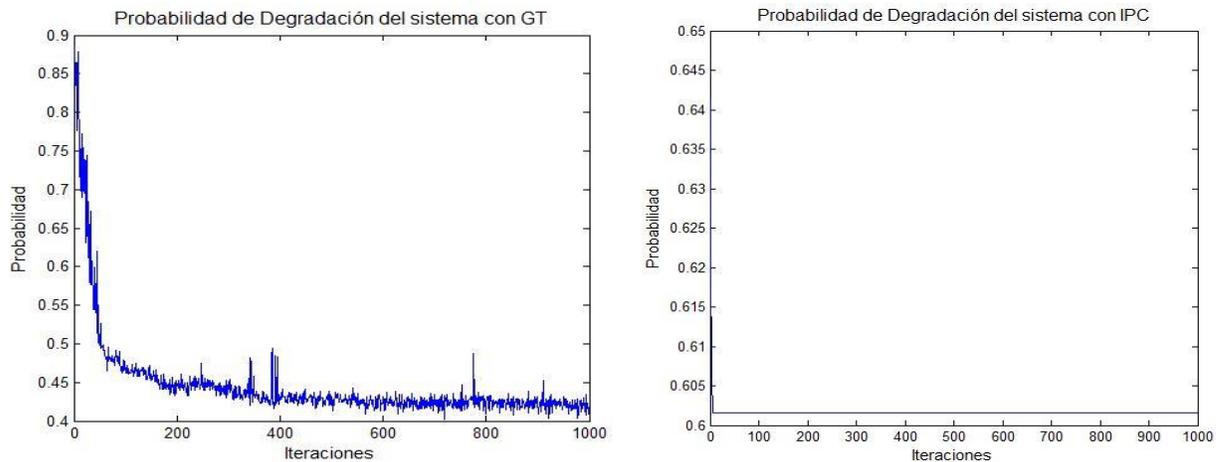


Figura 4.25. Probabilidad de degradación con GT e IPC.

La comparación entre la probabilidad de degradación obtenida en la celda del centro del sistema multicelular de este trabajo de grado con la probabilidad de degradación obtenida en la celda de 1Km al implementar el algoritmo definido en [15], donde se implementan los servicios de voz y datos simultáneamente, se aprecia en la figura 4.26. Se observa que al aplicar el algoritmo de PC sobre todas las celdas del sistema, la interferencia generada en la celda del centro disminuye, permitiendo un mayor número de UE conectados, por tanto un decremento en la probabilidad de degradación y un aumento en la capacidad del sistema en comparación con la capacidad obtenida al aplicar un algoritmo de PC basado en la GT en una única celda de un sistema multicelular.

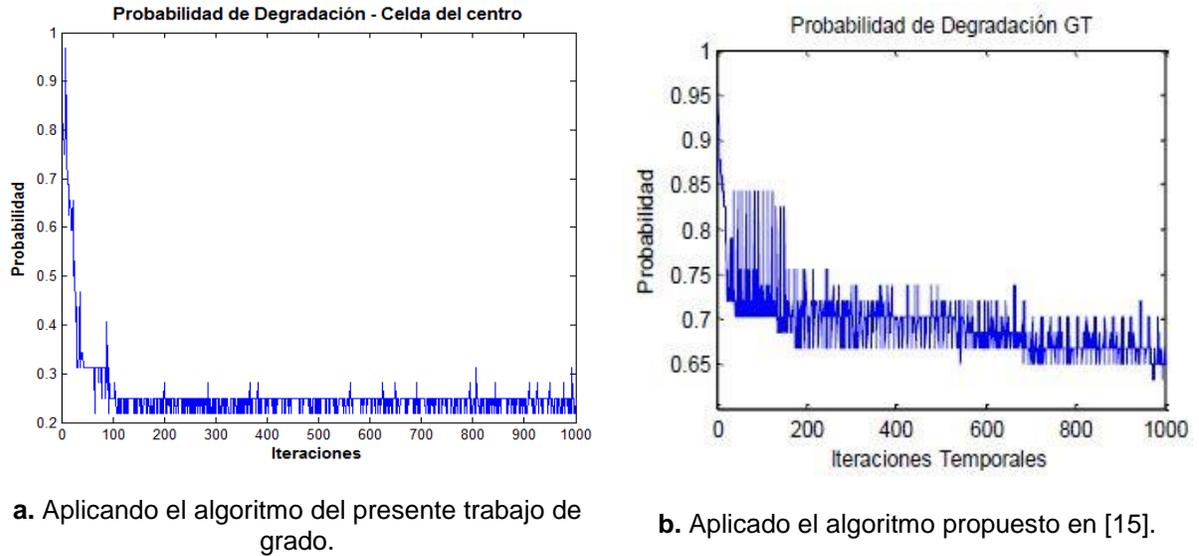


Figura 4.26. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.

### 4.2.2. Escenario 2: 0.5Km

En este escenario de simulación, el radio de las celdas disminuyó de 1Km a 0.5Km generando un mayor número de celdas que en el escenario 1 y una densidad de UE por celda de 12, como se muestra en la figura 4.27. Los identificadores de las celdas de los bordes corresponden a los números que rodean el escenario.

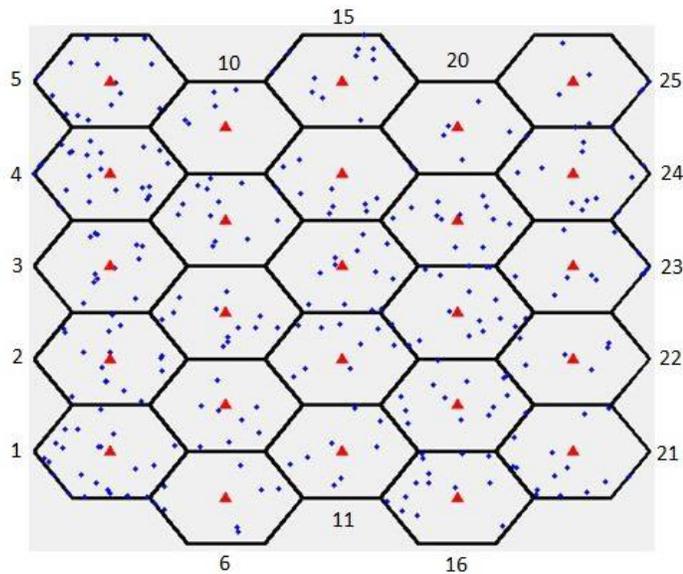


Figura 4.27. Escenario de simulación 2.



## Caso 1: Voz

Para este caso de simulación se ofreció el servicio de voz en celdas de radio igual a 0.5Km. El resultado se observa en la figura 4.28, en la cual se aprecia que todas la MBS del sistema brindan cobertura tanto a UE cercanos como lejanos, debido a que el algoritmo de PC basado en GT logró disminuir el nivel de interferencia presente en las 25 celdas. Por otra parte, la tabla 9 consigna la información propia de cada celda del sistema. Se observa que el porcentaje de UE conectados es de 99.67% lo cual indica un aumento en la capacidad del sistema del 9.34% con respecto a la capacidad obtenida en el caso 1 del escenario 1. Este aumento se debe a que en este escenario existe una mayor cantidad de MBS atendiendo el mismo número de UE, por lo que se reduce la interferencia intracelda.

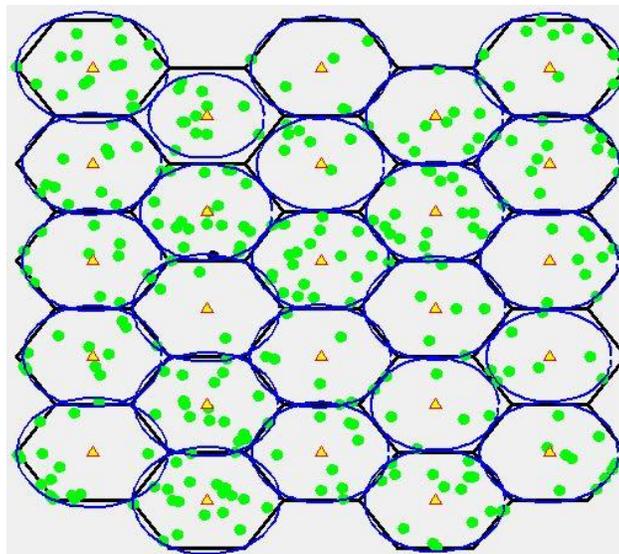


Figura 4.28. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz.

Tabla 9. Resultados obtenidos por celda, escenario 2 – voz.

Celda	Radio (Km)	Total UE	Total UE (%)	UE Conect.	Conect. (%)	UE No Conect.	No Conect. (%)
1	0.494	15	5	15	100	0	0
2	0.455	12	4	12	100	0	0
3	0.457	12	4	12	100	0	0
4	0.456	12	4	12	100	0	0
5	0.497	17	5.6667	17	100	0	0
6	0.482	19	6.3333	19	100	0	0
7	0.469	17	5.6667	17	100	0	0
8	0.483	4	1.3333	4	100	0	0



9	0.434	20	6.6667	19	95	1	5
10	0.379	12	4	12	100	0	0
11	0.450	11	3.6667	11	100	0	0
12	0.461	6	2	6	100	0	0
13	0.448	21	7	21	100	0	0
14	0.418	7	2.3333	7	100	0	0
15	0.459	6	2	6	100	0	0
16	0.459	16	5.3333	16	100	0	0
17	0.419	7	2.3333	7	100	0	0
18	0.464	6	2	6	100	0	0
19	0.451	19	6.3333	19	100	0	0
20	0.450	11	3.6667	11	100	0	0
21	0.453	10	3.3333	10	100	0	0
22	0.411	8	2.6667	8	100	0	0
23	0.452	9	3	9	100	0	0
24	0.461	12	4	12	100	0	0
25	0.487	11	3.6667	11	100	0	0
<b>Total</b>	---	300	100	299	---	1	---

El resultado obtenido para un UE ubicado a 98m de la MBS se muestra en la figura 4.29 y en la figura 4.30 se presenta el resultado obtenido para un UE ubicado a 415m. Las curvas de SINR obtenidas para ambos UE evidencian que los cambios de potencia se produjeron debido a que las SINR alcanzadas superaron el umbral establecido por el índice de tolerancia a interferencia del sistema, por tanto fue necesario disminuir la potencia de transmisión de los dos UE. Para el UE cercano a la MBS la potencia disminuyó 12dB y para el UE lejano disminuyó 8dB, con esto el algoritmo de PC basado en la GT controló el nivel de interferencia generado en el sistema, ya que garantizó que los UE transmitieran con potencias adecuadas.

Al igual que en los casos anteriores, se observa que el UE más cercano a la MBS requirió de una potencia de transmisión mucho menor que el UE que se encuentra a una mayor distancia.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

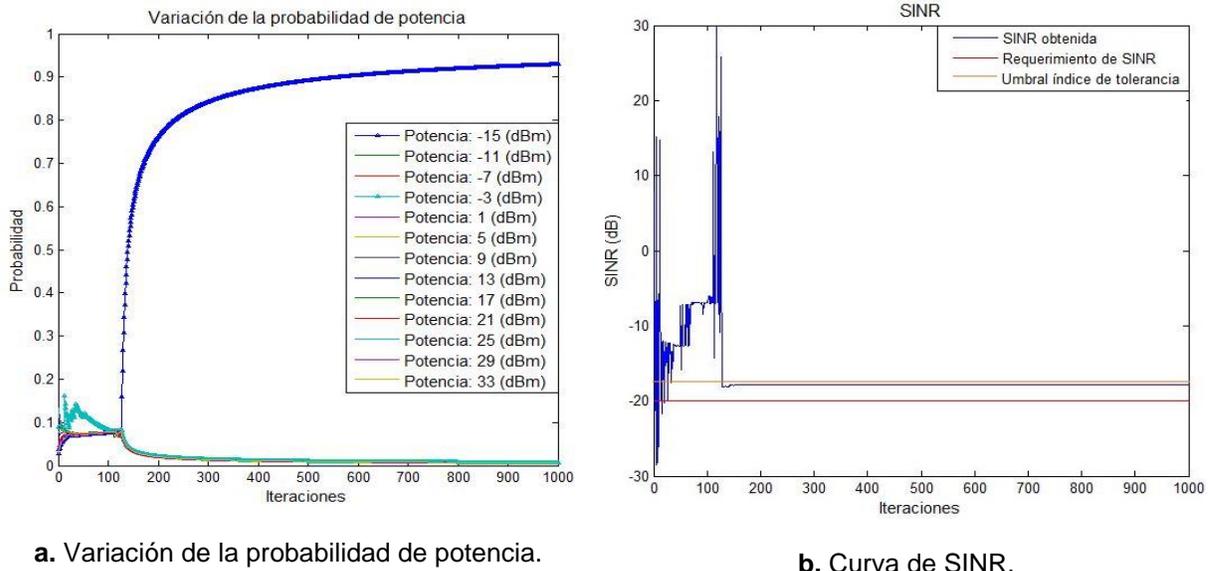


Figura 4.29. Resultado de un UE a 98m de la MBS.

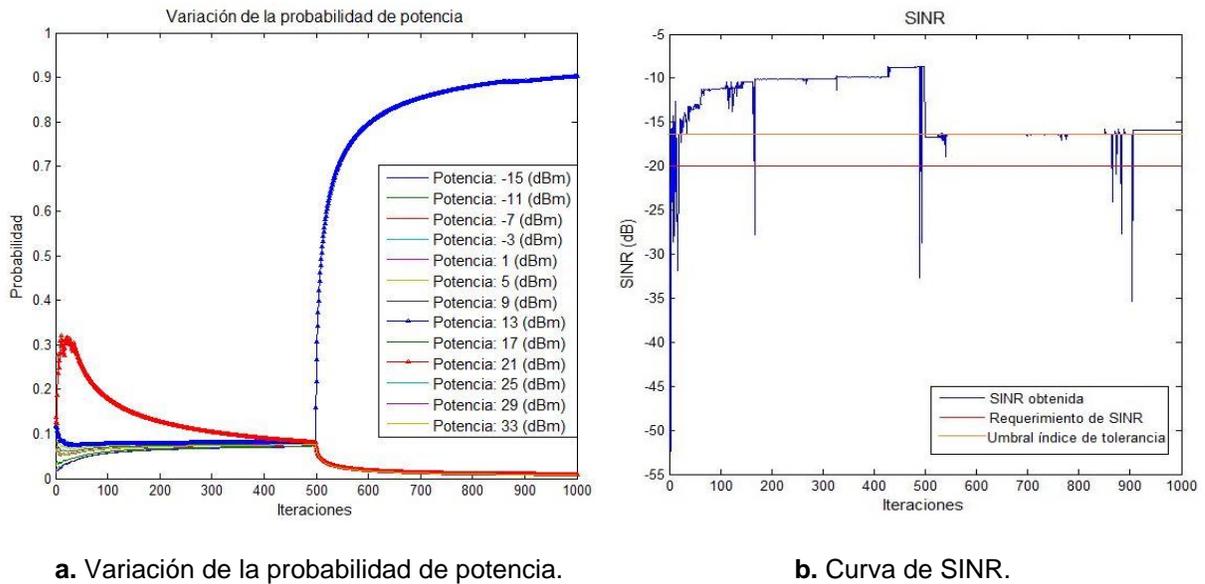


Figura 4.30. Resultado de un UE a 415m de la MBS.

La figura 4.31 muestra las SINR obtenidas para cinco UE conectados, en la cual se observa que en promedio los UE tardaron 150 iteraciones en aprender la estrategia que les generó una utilidad dentro de los límites establecidos por el requerimiento de SINR y el índice de tolerancia a interferencia del sistema.

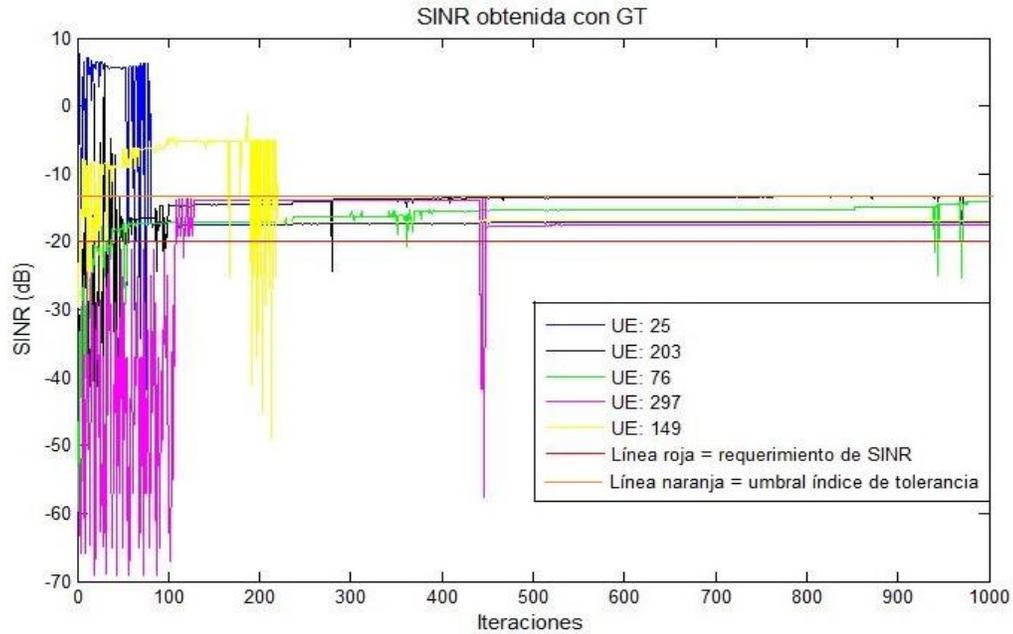


Figura 4.31. Variación de la SINR de cinco UE.

Al aplicar el algoritmo de IPC en este caso de simulación se obtuvieron 137 UE conectados, como se observa en la figura 4.32. Comparando este resultado con el obtenido al aplicar el algoritmo de PC basado en la GT se evidencia un aumento de la capacidad del 54% al implementar el algoritmo de GT. Teniendo en cuenta que valores altos en la probabilidad de degradación indican una baja capacidad del sistema, este aumento de la capacidad también se evidencia en las curvas de probabilidad de degradación de la figura 4.33, obtenidas para GT e IPC, en donde se observa que la curva de GT tiende a valores cercanos a cero a diferencia de la curva de IPC, la cual se mantiene constante en un valor de 0.5.

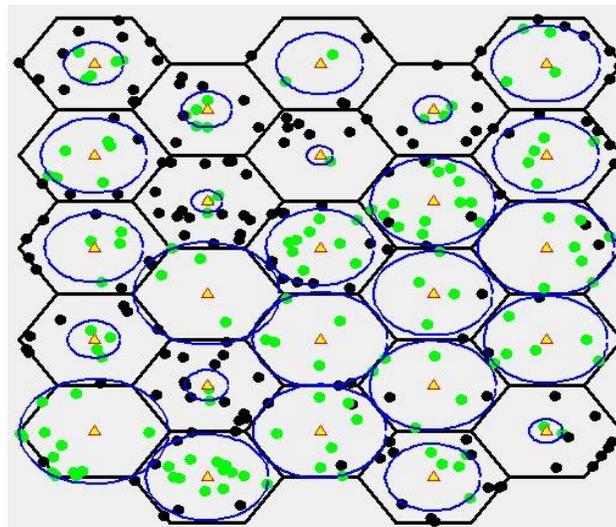


Figura 4.32. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz.

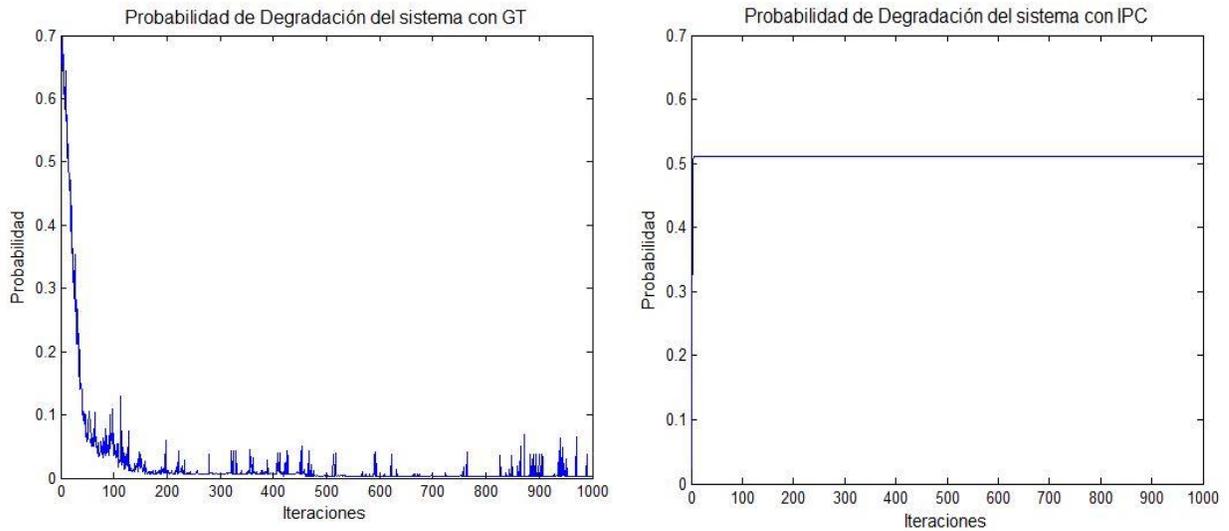
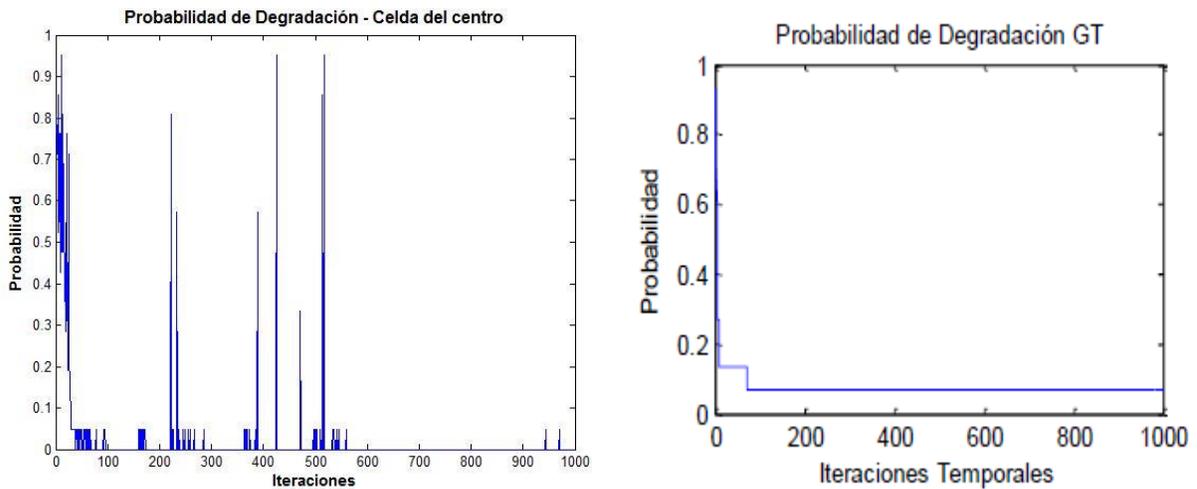


Figura 4.33. Probabilidad de degradación con GT e IPC.

La probabilidad de degradación obtenida en la celda del centro de este escenario, mostrada en la figura 4.34.a y la probabilidad de degradación obtenida en la celda de radio 0.5Km del sistema multicelular del trabajo de maestría [15], de la figura 4.34.b, presentan un comportamiento decreciente, sin embargo, se observa que al implementar el algoritmo de PC basado en GT en todas las celdas del sistema, la probabilidad de degradación de la celda del centro decae a 0 a diferencia del resultado obtenido en el trabajo de maestría en el cual, la probabilidad de degradación de su celda tiende a 0.1.



a. Aplicando el algoritmo del presente trabajo de grado.

b. Aplicando el algoritmo propuesto en [15].

Figura 4.34. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.



## Caso 2: Datos

En este caso de simulación se estableció un requerimiento de SINR igual a  $-14\text{dB}$  para todos los UE presentes en el sistema de comunicaciones. El resultado obtenido se observa en la figura 4.35. La tabla 10 presenta los resultados obtenidos para cada celda del sistema. Se aprecia que de un total de 300 UE se conectaron 259 lo que corresponde a una capacidad del 86.33%, comparado con el resultado obtenido en el escenario 1 donde se ofreció sólo el servicio de datos, se observa un aumento en la capacidad del sistema del 57.33%, esto debido a que el radio de la celdas disminuyó a la mitad por lo que hay mayor cantidad de MBS atendiendo el mismo número de UE. Por otra parte, el radio de cobertura promedio de las 25 MBS fue de 448m de modo que se ratifica que para el servicio de datos es necesario tener celdas con radios menores a 1 Km para generar un aumento de la capacidad del sistema.

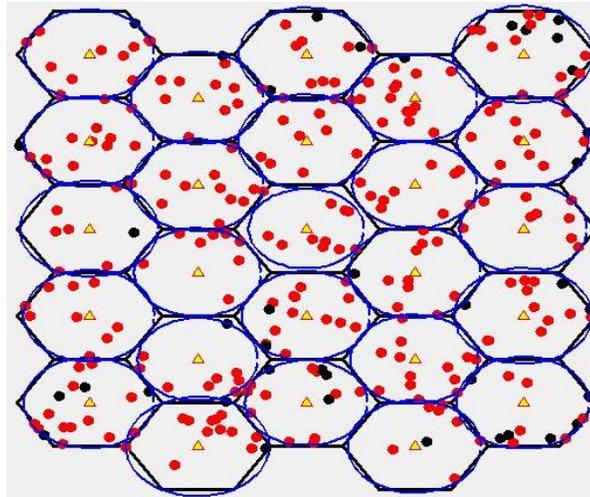


Figura 4.35. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – datos.

Tabla 10. Resultados obtenidos por celda, escenario 2 – datos.

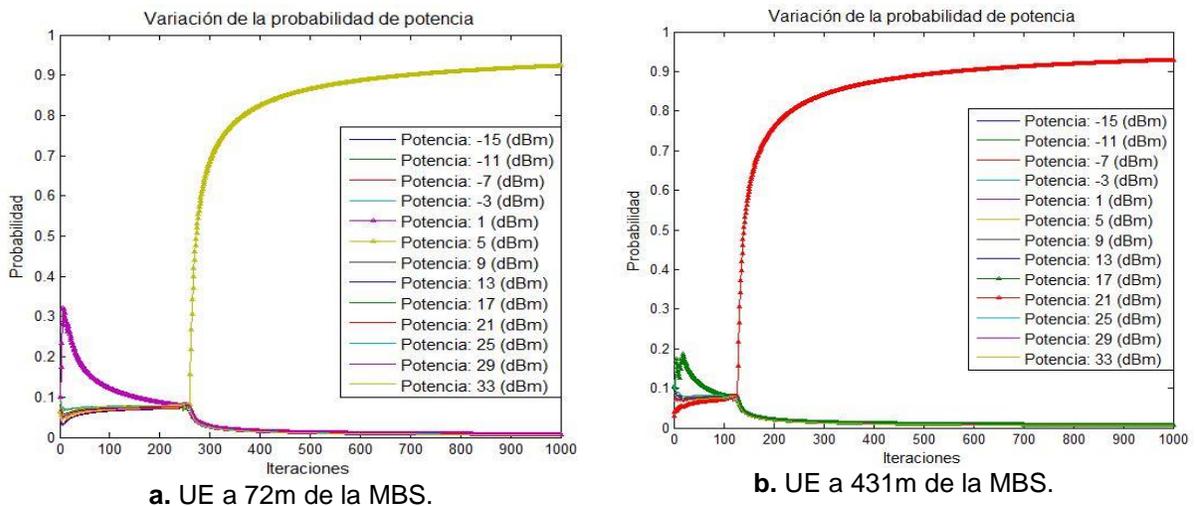
Celda	Radio (Km)	Total UE	Total UE (%)	UE Conect.	Conect. (%)	UE No Conect.	No Conect. (%)
1	0.449	17	5.6667	13	76.47	4	23.52
2	0.453	9	3	9	100	0	0
3	0.476	7	2.3333	6	85.71	1	14.28
4	0.448	14	4.6667	12	85.71	2	14.28
5	0.446	12	4	11	91.66	1	8.33
6	0.494	13	4.3333	12	92.30	1	7.69
7	0.413	10	3.3333	8	80	2	20
8	0.437	8	2.6667	8	100	0	0
9	0.457	12	4	12	100	0	0
10	0.458	11	3.6667	10	90.90	1	9.09
11	0.423	15	5	11	73.33	4	26.66



12	0.442	15	5	13	86.66	2	13.33
13	0.397	10	3.3333	10	100	0	0
14	0.468	9	3	9	100	0	0
15	0.464	12	4	9	75	3	25
16	0.459	8	2.6667	7	87.50	1	12.50
17	0.441	13	4.3333	13	100	0	0
18	0.454	11	3.6667	10	90.90	1	9.09
19	0.429	10	3.3333	10	100	0	0
20	0.434	16	5.3333	15	93.75	1	6.25
21	0.457	13	4.3333	6	46.15	7	53.84
22	0.474	14	4.6667	11	78.57	3	21.42
23	0.439	9	3	9	100	0	0
24	0.453	14	4.6667	12	85.71	2	14.28
25	0.482	18	6	13	72.22	5	27.77
<b>Total</b>	---	300	100	259	---	41	---

Las probabilidades de potencia obtenidas en cada instante de tiempo para dos UE ubicados a 72m y a 431m de sus MBS, se muestran en las curvas de variación de probabilidad de las figura 4.36.a y 4.36.b, respectivamente. Se observa que, al igual que en los casos del escenario 1 y en el caso 1 del escenario 2, el UE que se encuentra más cerca de la MBS necesitó de una menor potencia para conectarse que el UE más lejano.

En el caso 2 del escenario 1 se muestra un UE ubicado a 516m de la MBS el cual utilizó una potencia de 33dBm para conectarse, mientras que para este caso, un UE ubicado a 431m de la MBS empleó una potencia de 21dBm, lo cual indica que al tener celdas con menor radio de cobertura, los UE requieren menor potencia de transmisión para conectarse, debido a que la interferencia intracelda es menor.



**Figura 4.36.** Variación de la probabilidad de potencia.



La figura 4.37 muestra el resultado obtenido para un UE no conectado, el cual después de escoger diferentes potencias de transmisión, seleccionó su máxima potencia con la cual logró conectarse durante pocas iteraciones, pero debido a que la interferencia del sistema aumentó, esta potencia no fue suficiente para mantener al UE conectado, por lo que el algoritmo disminuyó la probabilidad de esta potencia hasta que en la iteración 754, seleccionó nuevas potencias de transmisión, pero como se observa en la curva de SINR de la figura 4.37.b ninguna de estas potencias fue suficiente para conectar nuevamente al UE.

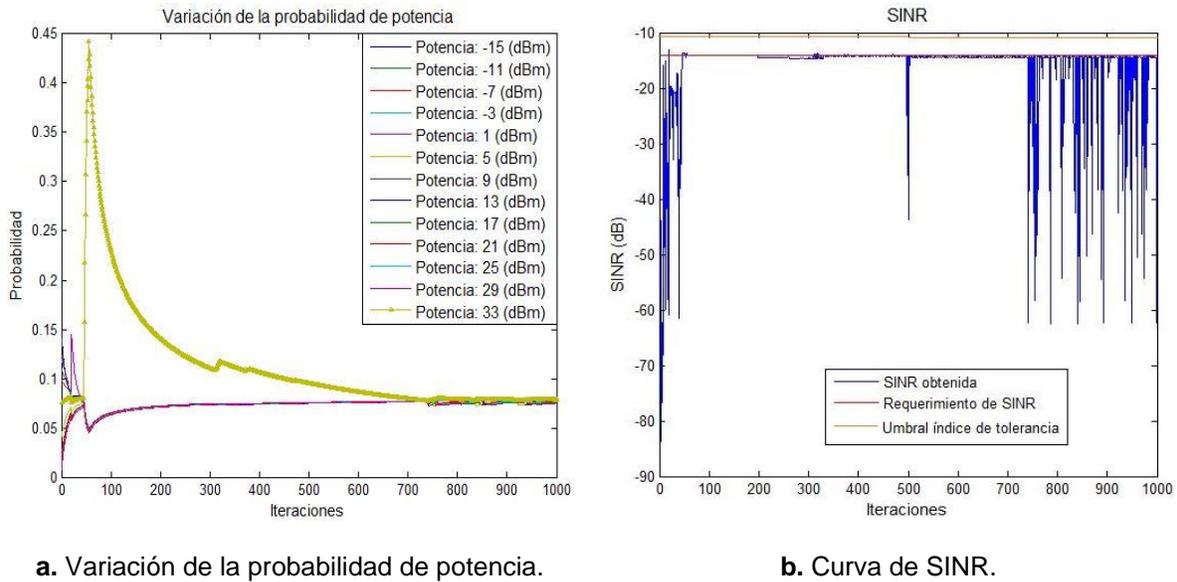
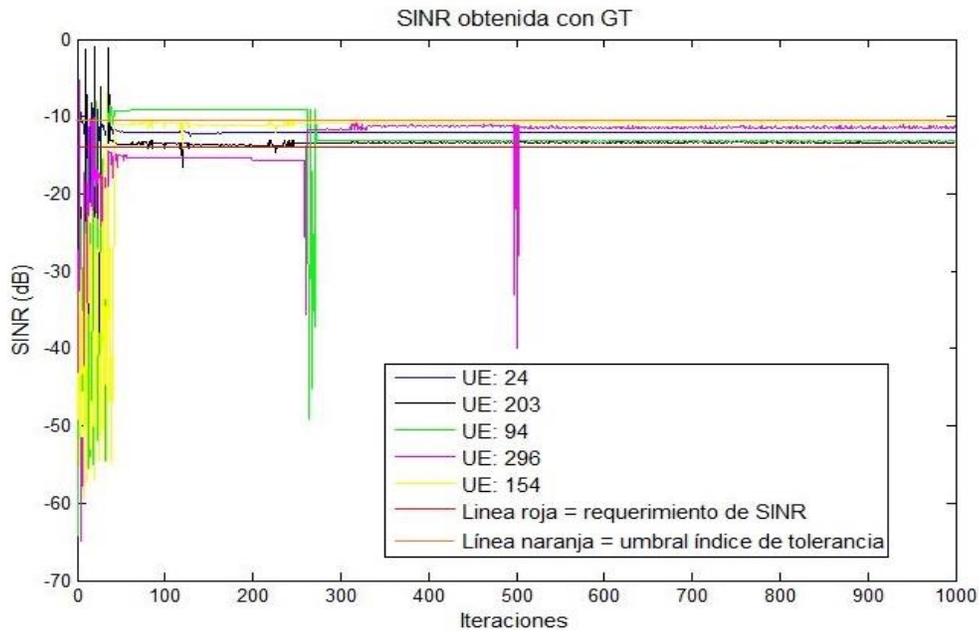


Figura 4.37. Resultado de un UE no conectado.

Las curvas de SINR obtenidas para cinco UE conectados se muestran en la figura 4.38, donde se observa que el algoritmo de PC basado en la GT mantiene las SINR por encima del umbral establecido para el servicio de datos pero sin sobrepasar el límite dado por el índice de tolerancia a interferencia.



**Figura 4.38.** Variación de la SINR de cinco UE.

El resultado obtenido al aplicar IPC se muestra en la figura 4.39, donde se conectaron 139 UE, lo que equivale a una capacidad del 46.33%. Se observa que la capacidad del sistema disminuyó 40% en comparación con la capacidad obtenida al aplicar el algoritmo de PC basado en la GT, sin embargo, este resultado es mejor que el obtenido al aplicar IPC en celdas de 1Km, donde ningún UE logró conectarse al sistema.

Comparando las curvas de probabilidad de degradación de la figura 4.40 obtenidas al implementar el algoritmo de PC basado en GT y el algoritmo de IPC, se puede notar como la curva obtenida para GT decrece rápidamente hasta alcanzar un valor aproximado a 0.1, mientras que para IPC, la curva es constante y se mantiene en 0.52, lo cual indica que con el algoritmo basado en GT se tiene una disminución progresiva de las probabilidades de degradación de las celdas del sistema, a diferencia de IPC cuyas probabilidades son constantes la mayor parte del tiempo.

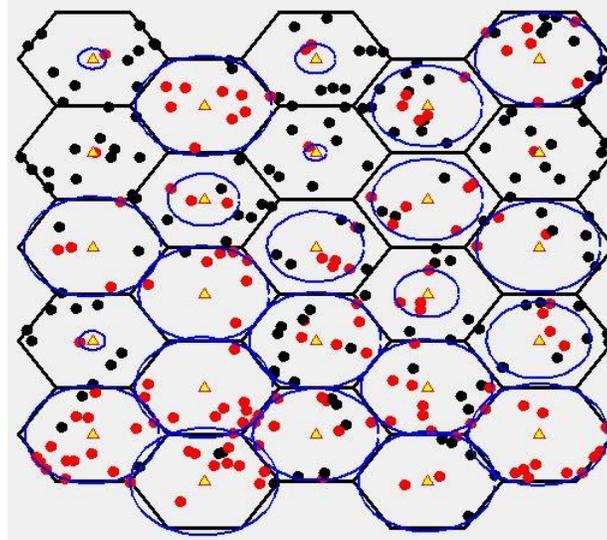


Figura 4.39. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – datos.

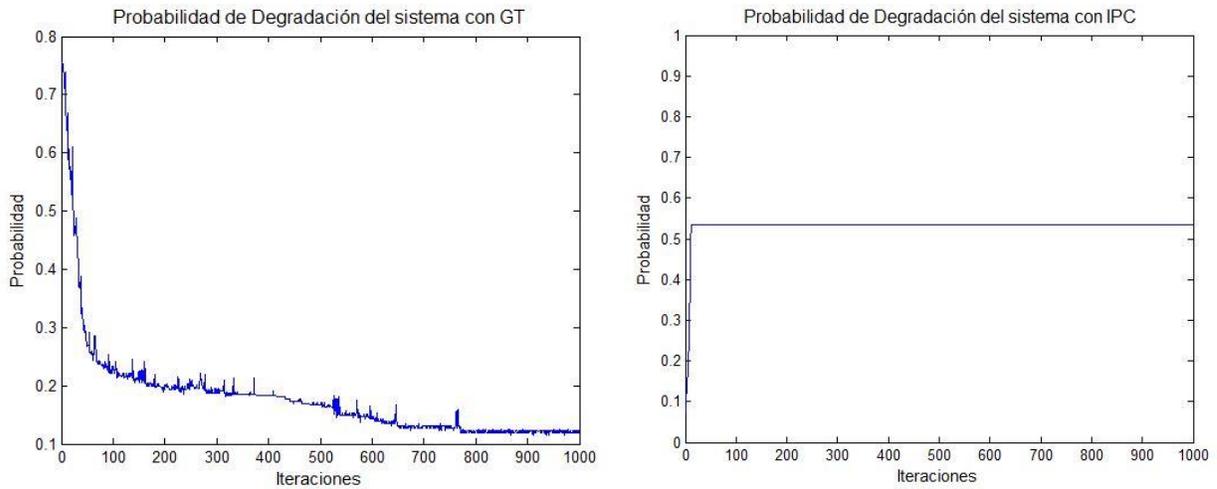
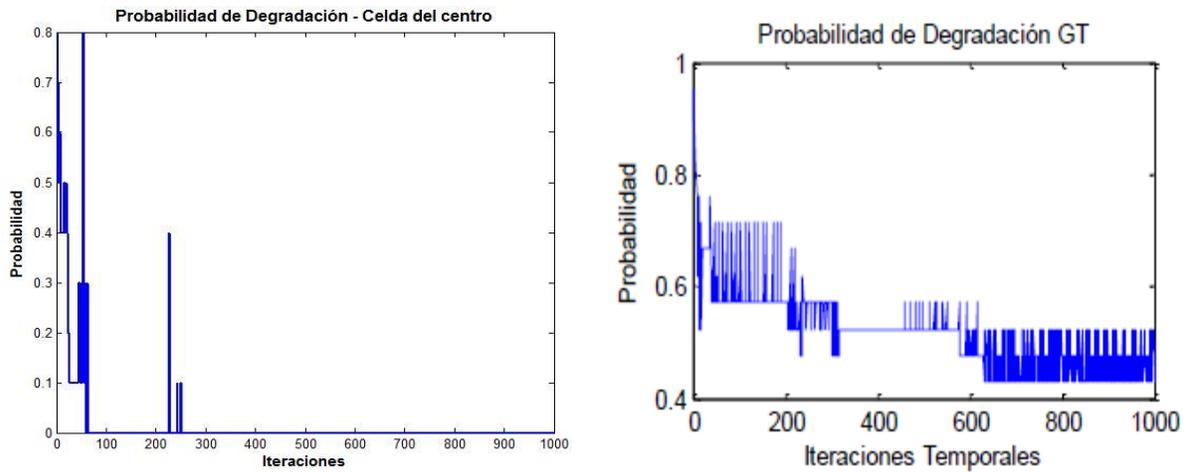


Figura 4.40. Probabilidad de degradación con GT e IPC.

La figura 4.41 muestra como la probabilidad de degradación obtenida en la celda del centro para este caso de simulación decrece de manera más rápida que la probabilidad de degradación obtenida al aplicar un algoritmo de la GT en una sola celda de un sistema multicelular [15], alcanzando un valor igual a cero<sup>9</sup> mientras la otra se mantiene por encima de 0.4.

<sup>9</sup> Una probabilidad de degradación iguala cero indica que la capacidad alcanzada en la celda fue del 100%.



- a. Aplicando el algoritmo del presente trabajo de grado.
- b. Aplicando el algoritmo propuesto en [15].

Figura 4.41. Probabilidad de degradación en una celda del sistema multicelular.

### Caso 3: Voz y Datos

Para este caso de simulación, se asignó de forma aleatoria a cada UE un requerimiento de SINR, -20dB para voz y -14dB para datos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.42.

La tabla 11 muestra los resultados obtenidos en cada una de las celdas del sistema, donde se observa que de 300 UE presentes se lograron conectar 294, de los cuales 150 se conectaron a voz y 144 a datos. Se aprecia que los radios de cobertura de las celdas oscilan entre 344 y 493m, lo cual representa un buen resultado, dado que el radio máximo de cobertura de cada celda es de 500m.

Al realizar la comparación de este resultado con el obtenido en el caso 3 del primer escenario se evidencia una mejora en la capacidad del sistema del 41%, esto debido a que la cantidad de UE presentes en cada celda es menor que los presentes en las celdas del primer escenario.

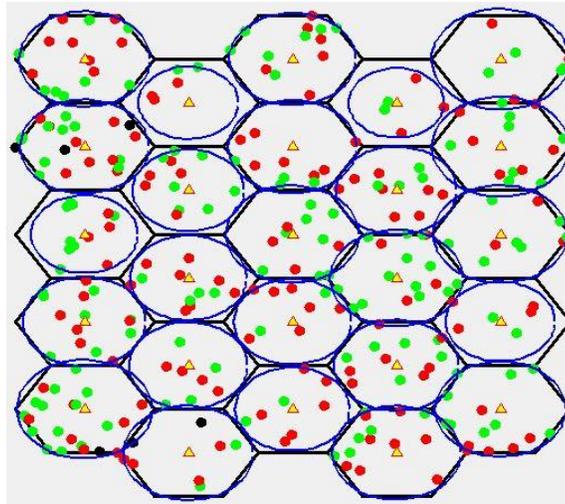


Figura 4.42. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz y datos.

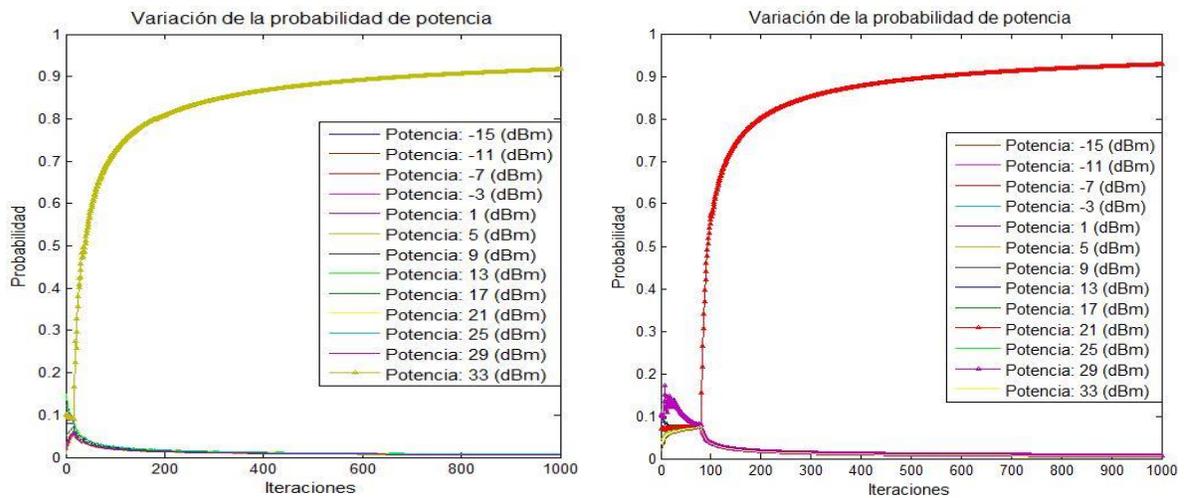
Tabla 11. Resultados obtenidos por celda, escenario 2 – voz y datos.

Celda	Radio (Km)	Total UE	Total UE (%)	UE Conect.	Conect. (%)	UE No Conect.	No Conect. (%)
1	0.385	12	4	12	100	0	0
2	0.464	22	7.3333	19	86.36	3	13.63
3	0.471	16	5.3333	16	100	0	0
4	0.467	8	2.6667	6	75	2	25
5	0.426	8	2.6667	8	100	0	0
6	0.419	12	4	12	100	0	0
7	0.402	12	4	12	100	0	0
8	0.359	5	1.6667	5	100	0	0
9	0.412	8	2.6667	8	100	0	0
10	0.423	9	3	9	100	0	0
11	0.480	12	4	12	100	0	0
12	0.461	11	3.6667	11	100	0	0
13	0.456	13	4.3333	13	100	0	0
14	0.463	14	4.6667	14	100	0	0
15	0.450	14	4.6667	14	100	0	0
16	0.478	16	5.3333	16	100	0	0
17	0.434	13	4.3333	13	100	0	0
18	0.344	5	1.6667	5	100	0	0
19	0.470	14	4.6667	14	100	0	0
20	0.394	6	2	6	100	0	0
21	0.482	11	3.6667	11	100	0	0
22	0.493	14	4.6667	14	100	0	0
23	0.385	12	4	12	100	0	0



24	0.464	22	7.3333	19	86.36	3	13.63
25	0.471	16	5.3333	16	100	0	0
<b>Total</b>	---	300	100	294	---	6	---

En la figura 4.43.a y 4.43.b, se muestra la variación de la probabilidad de potencia de dos UE, uno ubicado a 396m de la MBS y que accedió al servicio de datos y otro que se encuentra a 391m de la MBS y accedió al servicio de voz, respectivamente. Estas probabilidades de potencia evidencian el comportamiento del algoritmo de PC basado en GT, el cual para los dos UE, después de pocas iteraciones encuentra la potencia de transmisión que les permite conectarse al servicio que están solicitando, particularmente, el UE que accedió a datos requirió una potencia de 33dBm, por encima a la potencia requerida por el UE que accedió a voz, la cual fue de 21dBm.



a. UE ubicado a 396m de la MBS – Datos.

b. UE ubicado a 391m de la MBS – Voz.

**Figura 4.43.** Variación de la probabilidad de potencia.

En las figuras 4.44 y 4.45, se aprecian los resultados obtenidos para dos UE que se conectaron al mismo servicio pero que están a diferentes distancias de su respectiva MBS. De las curvas de SINR obtenidas para ambos UE se aprecia que el algoritmo estabilizó sus SINR sobre un valor por encima del umbral, aproximadamente después de las 100 iteraciones. Además al comprar las curvas de variación de la probabilidad de potencia, se observa que el UE más lejano requirió una potencia de transmisión más alta que el UE más cercano a la MBS.

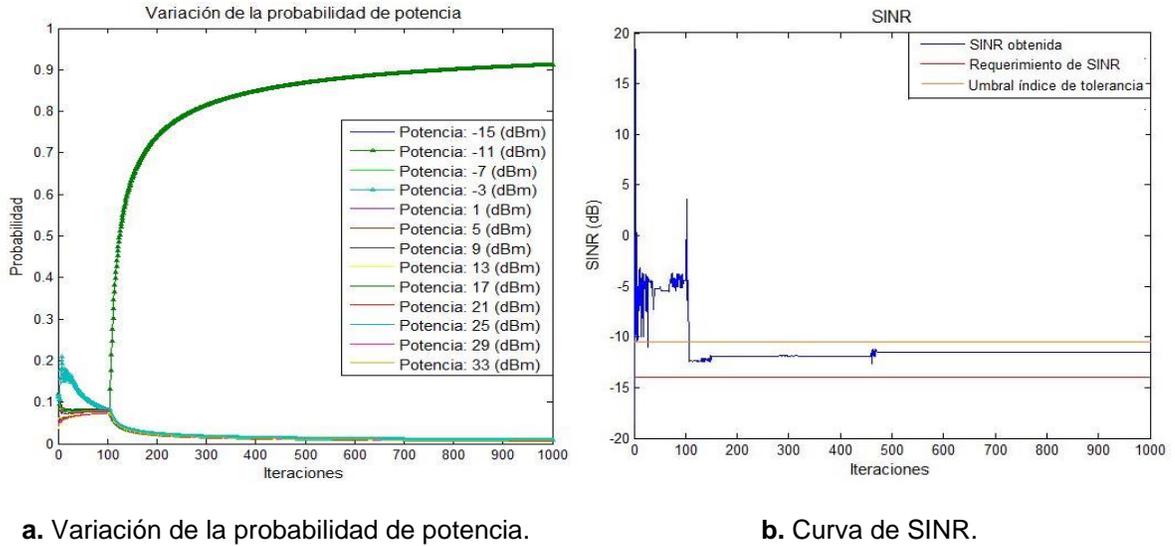


Figura 4.44. Resultado de un UE a 38m de la MBS.

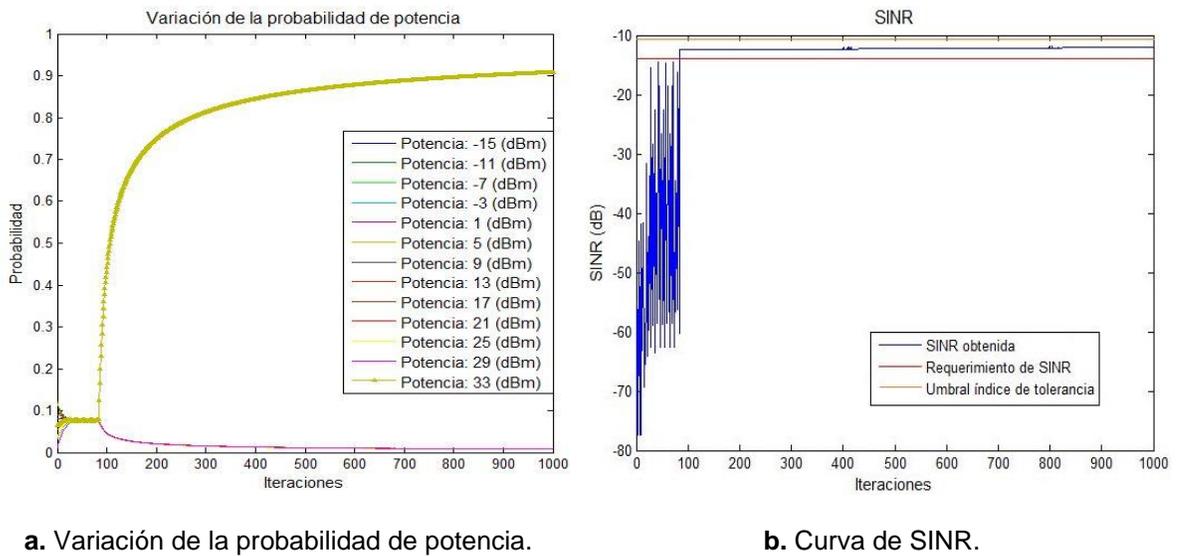
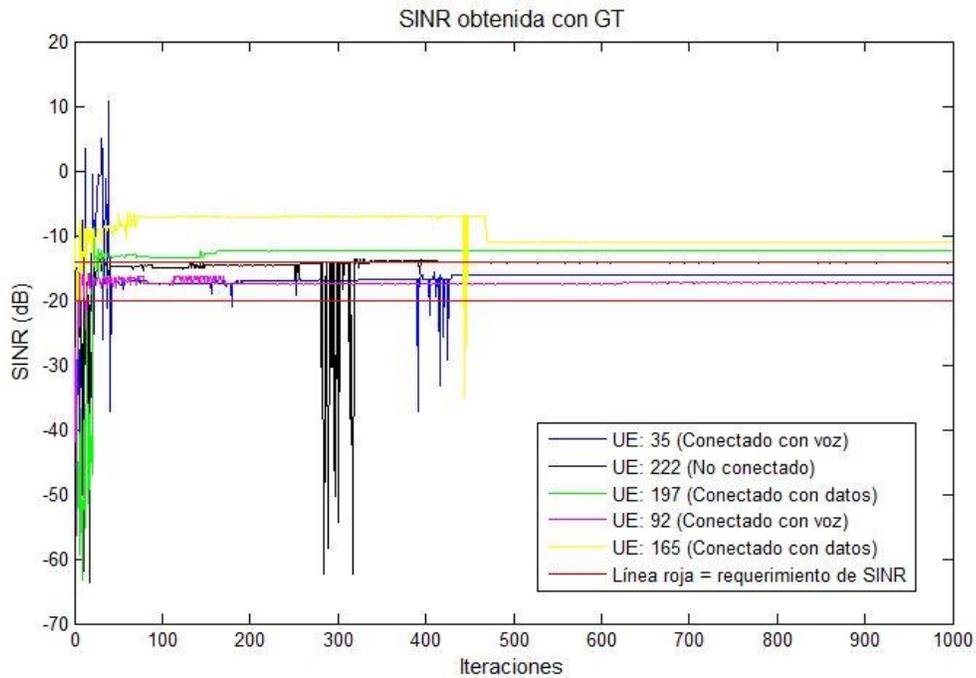


Figura 4.45. Resultado de un UE a 478m de la MBS.

En la figura 4.46, se presentan las curvas de SINR obtenidas por 5 UE, de los cuales, 2 se conectaron con voz, 2 con datos y uno no se conectó al sistema. Se aprecia que las curvas de los UE conectados, después de las 450 iteraciones se estabilizan por encima del umbral establecido, contrario a lo que sucede con la curva de SINR obtenida por el UE que no se conectó al sistema, la cual se estabilizó en un valor por debajo de requerimiento asignado a este UE, el cual fue de -14dB.



**Figura 4.46.** Variación de la SINR de cinco UE.

El resultado obtenido al aplicar el algoritmo de IPC se aprecia en la figura 4.47, en el cual, la cantidad de UE conectados fue de 91, 53 conectados con voz y 38 con datos. A pesar de que la mayoría de los UE no accedieron a un servicio, todas las celdas del sistema conectaron al menos 1 UE, a diferencia del resultado obtenido al aplicar IPC en el caso 3 del primer escenario, donde en 4 celdas ningún UE se conectó.

Este resultado con respecto al obtenido al aplicar el algoritmo de PC basado en la GT, muestra un deterioro en la capacidad del sistema del 67.66%, ya que como se observa en la curva de probabilidad de degradación obtenida con IPC de la figura 4.48, este algoritmo no permite disminuir la probabilidad de degradación de sus celdas, a diferencia del algoritmo de GT, el cual debido a que implementa la técnica del RL, permite mejorar las curvas de probabilidad de degradación en cada instante de tiempo.

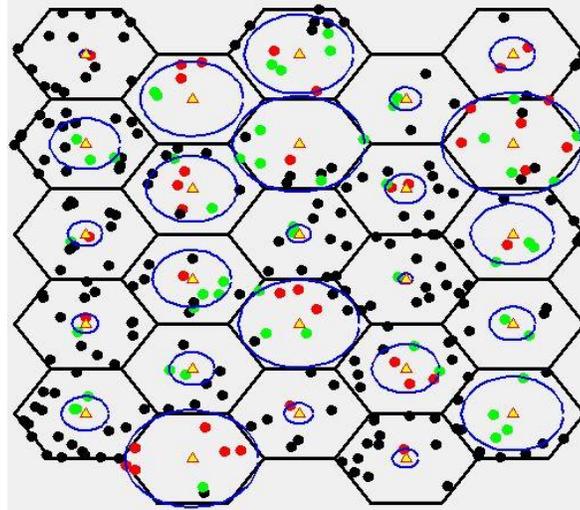


Figura 4.47. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz y datos.

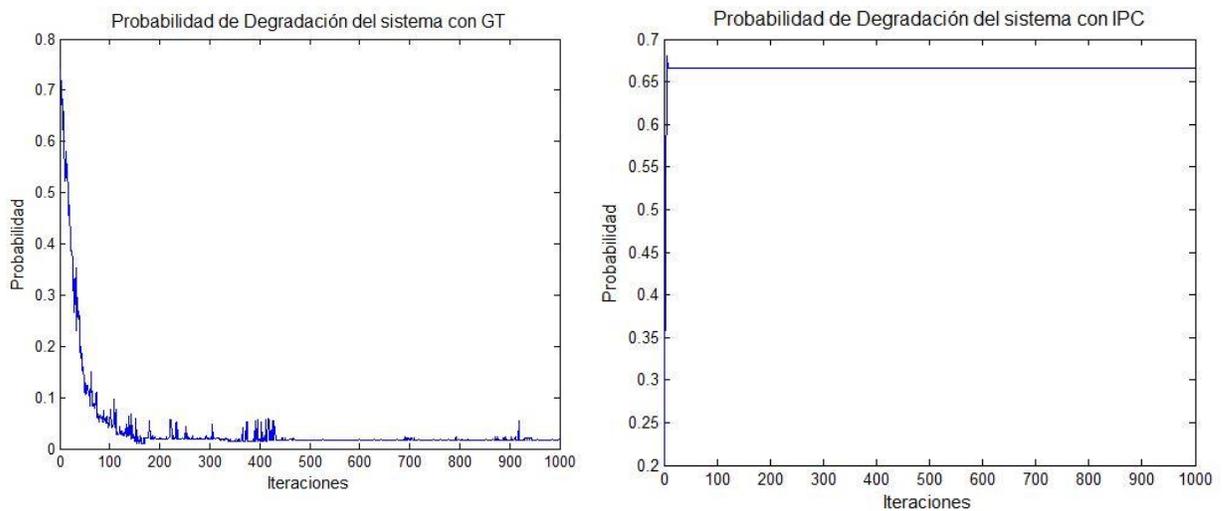


Figura 4.48. Probabilidad de degradación con GT e IPC.

La curvas de probabilidad de degradación para la celda del centro del sistema multicelular y para la celda del sistema presentado en [15], de la figura 4.49, permiten analizar que al implementar un algoritmo de PC basado en la GT en todas las celdas de un sistema multicelular disminuye la interferencia presente en el sistema, particularmente en la celda del centro, permitiendo una mayor cantidad de UE conectados en comparación con la cantidad de UE conectados al implementar el algoritmo en una única celda del sistema multicelular.





Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

---



# CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

## 5.1. Conclusiones

- ✓ Una simulación a nivel de sistema permite analizar de manera global las características y el comportamiento de los UE y las MBS que conforman un sistema de comunicaciones, cuando en este se implementan técnicas de PC.
- ✓ A nivel general, la capacidad de un sistema multicelular aumenta si el radio de sus celdas disminuye y la cantidad de UE presentes en el sistema no varía, ya que se tienen más MBS atendiendo la misma cantidad de UE por lo que se reduce la interferencia intracelda.
- ✓ La asignación dinámica de las potencias de transmisión mitiga el impacto que tiene el efecto cerca-lejos, en la capacidad de un sistema con portadora única.
- ✓ En sistemas multicelulares limitados por interferencia el uso de la GT y el RL en los procesos de PC, genera un aumento en la capacidad del sistema, por lo que las convierte en una buena alternativa para el modelado de técnicas de PC.
- ✓ El aumento del requerimiento de SINR no influye significativamente en la capacidad del sistema cuando este implementa un algoritmo de PC basado en GT.
- ✓ La inclusión del RL en técnicas de PC permite que los UE aprendan si una estrategia les genera buenas utilidades.
- ✓ La inserción del SE en un algoritmo de PC garantiza un uso eficiente de la potencia de transmisión por parte de los UE.



- ✓ En el contexto de sistemas limitados por interferencia, el algoritmo de PC basado en GT presenta un mejor desempeño que el algoritmo de IPC.
- ✓ Un algoritmo de PC, diseñado para ser implementado en una celda de un sistema multicelular, no debe implementarse en todas las celdas, sin realizar un análisis previo de los parámetros implicados.
- ✓ En un ambiente multicelular, la capacidad de un sistema de comunicaciones aumenta cuando se implementan mecanismos de PC en todas sus celdas, en comparación con la capacidad obtenida en sistemas donde se implementa el algoritmo en una sola celda.

## 5.2. Trabajos futuros

Dado el modelo de PC definido en este trabajo de grado y los resultados obtenidos, se proponen los siguientes trabajos:

- Implementación del modelo de PC basado en GT en un escenario de simulación que tenga en cuenta la movilidad de los UE y analizar el impacto que tiene la movilidad en el modelo de PC.
- Aplicación de técnicas de reuso de frecuencia en un sistema multicelular que implemente el modelo de PC basado en GT, de manera que se haga un uso eficiente de los recursos radio disponibles.
- Comparación de los resultados obtenidos con el modelo de PC basado en GT con los que se obtendrían al implementar en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única otros modelos de PC y analizar en términos de cobertura, capacidad y degradación del sistema el comportamiento de los algoritmos.
- Análisis de la capacidad del sistema vista como velocidad promedio de transmisión de cada UE presente en el sistema.



## APÉNDICE A

En el presente apéndice se muestran los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo propuesto inicialmente en los dos escenarios de simulación. Para esto, se realizaron 1000 simulaciones para cada caso con el objetivo de observar el comportamiento general del algoritmo, teniendo en cuenta que este se repite durante mil iteraciones y que la ubicación de los UE varía entre cada simulación.

Para cada caso de simulación se presenta el histograma de número de UE atendidos, obtenido y un resultado conseguido a partir de la información extraída del histograma.

### A.1. Escenario 1: 1Km

#### Caso 1: Voz

En la figura A.1 se muestra el histograma obtenido para este caso de simulación, en el cual se observa que el resultado que más se repitió fue 133 UE conectados, valor que constituye la moda, con un promedio de 138 y una desviación estándar de 24.

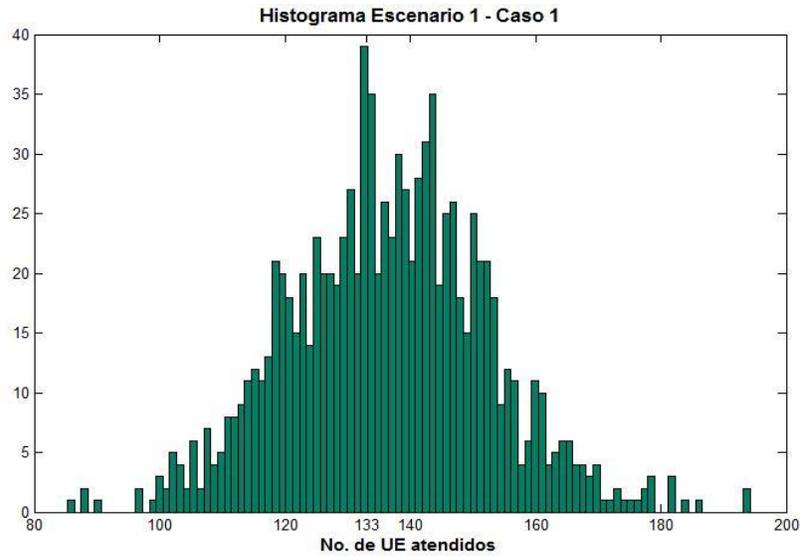


Figura A.1. Histograma, escenario 1 – voz.

La figura A.2 muestra la cantidad de UE conectados al sistema (puntos de color verde) y los UE que no pudieron establecer comunicación con su respectiva MBS (puntos de color negro). De un total de 300 UE presentes en el sistema de comunicaciones se conectaron 139, lo que corresponde al 46.33%. Esto indica que más de la mitad de los UE no alcanzaron el nivel de SINR requerido para conectarse al sistema.

Las curvas de probabilidad de degradación de la figura A.3 evidencian que de 7 celdas solo 1 consiguió estabilizar su probabilidad de degradación, las demás no lo lograron debido a que el algoritmo no pudo controlar el nivel de interferencia generado en el sistema.

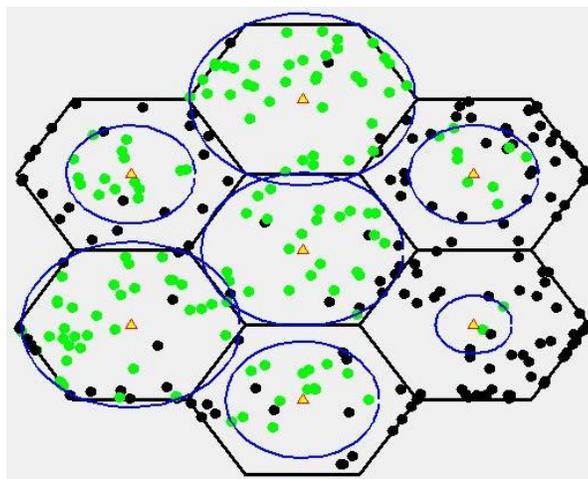


Figura A.2. Resultado obtenido, escenario 1 – voz.

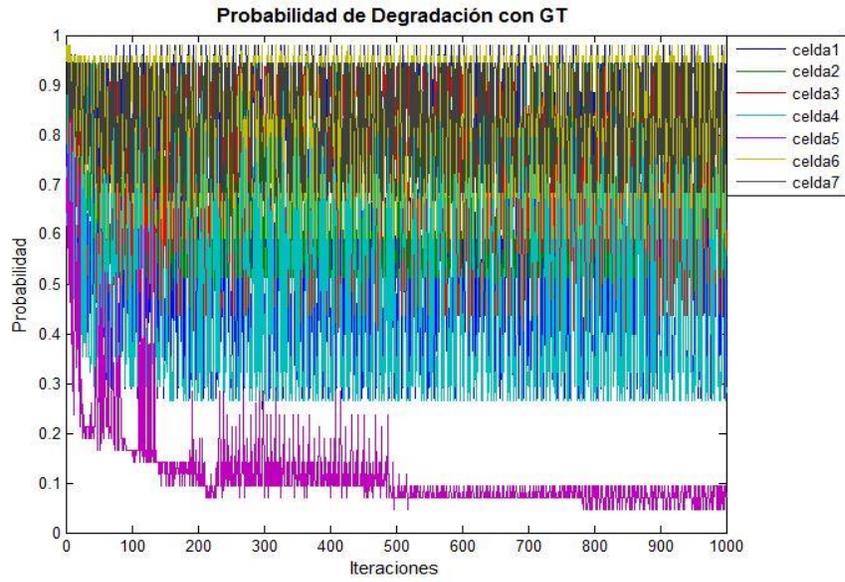


Figura A.3. Probabilidad de degradación, escenario 1 – voz.

## Caso 2: Datos

Para este caso de simulación se obtuvo el histograma de la figura A.4, el cual muestra que en promedio se conectaron 67 UE con una desviación estándar de 13. Además se aprecia que el resultado más frecuente fue de 70 UE conectados.

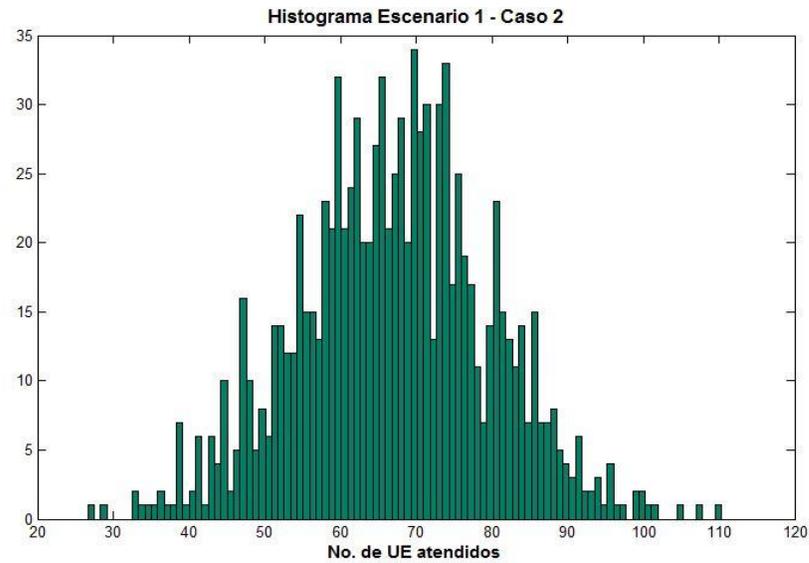


Figura A.4. Histograma, escenario 1 – datos.



Con base en el histograma de la figura A.4, en la figura A.5 se presenta el resultado obtenido para este caso, en el cual, los UE conectados al sistema se representan mediante los puntos rojos y los no conectados con punto de color negro. Se observa que se conectaron 70 lo cual corresponde al 23.33% del total de los UE presentes en el sistema. Comparando este resultado con el obtenido en el caso anterior, se tiene una disminución de la capacidad del sistema del 22.99%, esto debido a que el requerimiento de SINR aumentó lo que produjo un incremento del nivel de interferencia.

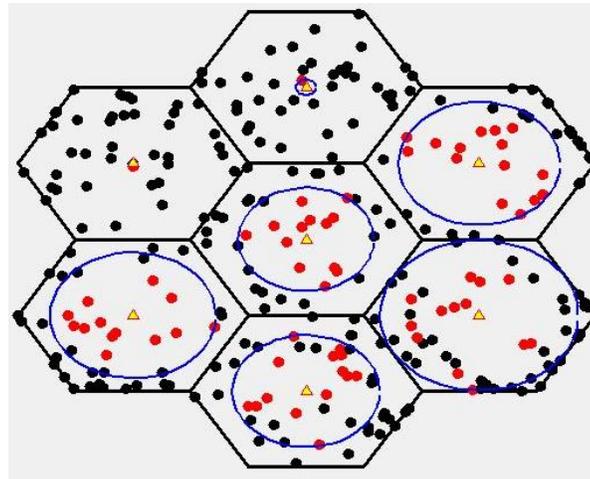


Figura A.5. Resultado obtenido, escenario 1 – datos.

En la figura A.6 se muestran las curvas de probabilidad de degradación obtenidas en cada celda del sistema. En esta figura se aprecia que 5 celdas lograron estabilizar su probabilidad de degradación pero en valores superiores a 0.65.

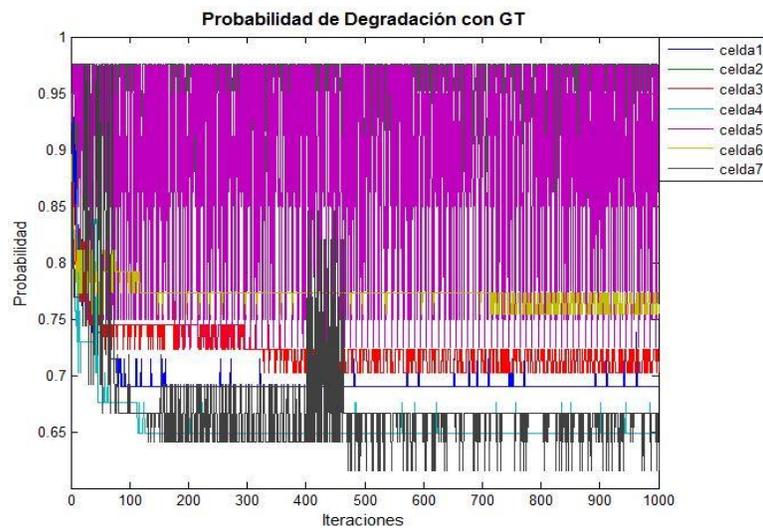


Figura A.6. Probabilidad de degradación, escenario 1 – datos.



### Caso 3: Voz y Datos

En este caso de simulación se ofrecieron los servicios de voz y datos simultáneamente, de forma que un UE sólo pudo acceder a uno de ellos durante una simulación. El histograma obtenido se muestra en la figura A.7, donde se observa que la moda fue de 107 UE conectados y el promedio fue de 101 con una desviación estándar de 21.

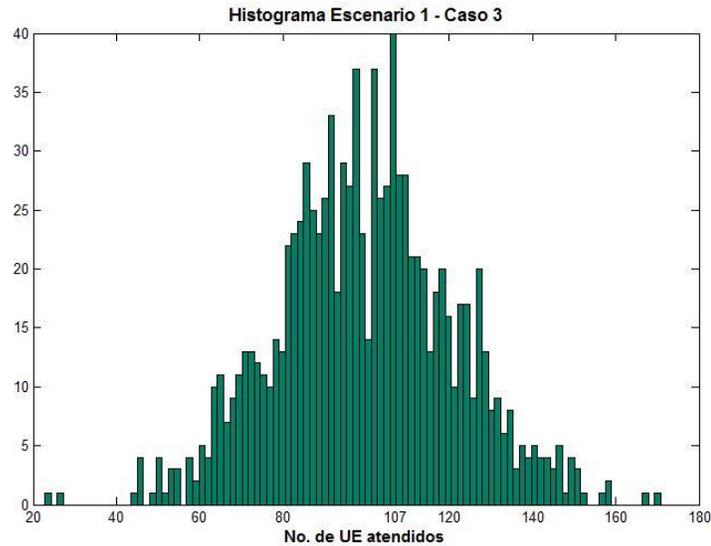


Figura A.7. Histograma, escenario 1 – voz y datos.

En la figura A.8 se presenta el resultado obtenido en este caso de simulación, donde de 300 UE se conectaron 108, de los cuales 66 se conectaron a voz y 42 a datos. Al comparar los resultados de los tres caso de simulación del escenario 1, se observa que en este caso, la capacidad aumentó con respecto al caso 2, donde sólo se ofreció el servicio de datos, pero disminuyó en comparación con el caso 1.

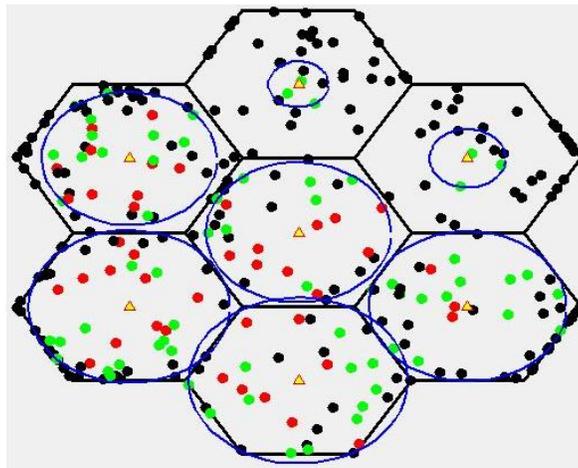


Figura A.8. Resultado obtenido, escenario 1 – voz y datos.



Las curvas de probabilidad de degradación obtenidas para cada celda del sistema se muestran en la figura A.9 en la cual se observa que solo 4 celdas estabilizaron sus probabilidades en valores superiores a 0.4, en comparación con los resultados obtenidos en el caso anterior, estos resultados presentan un mejor comportamiento.

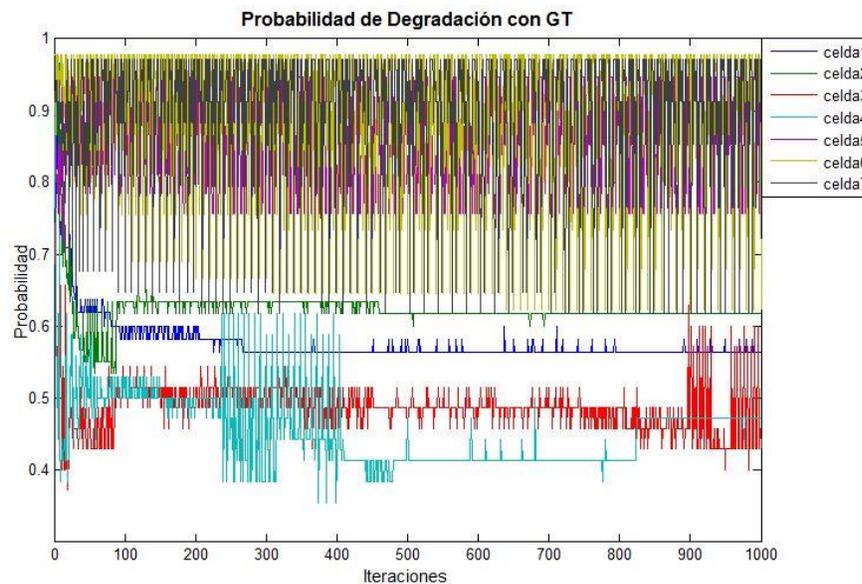
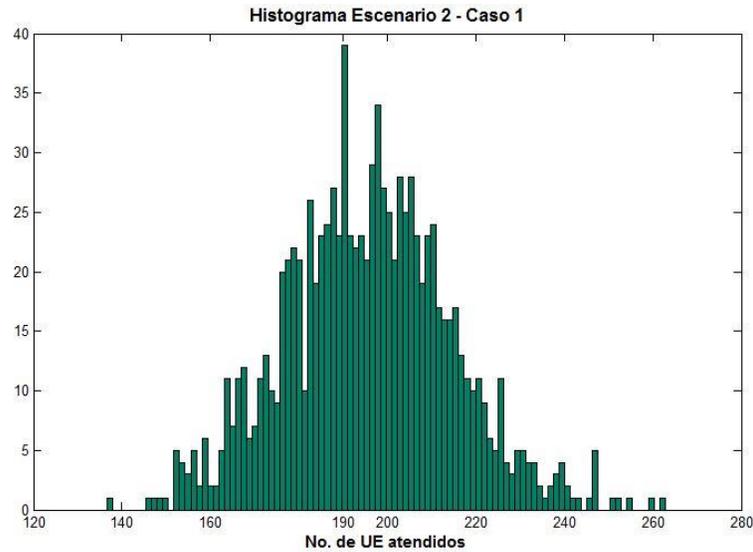


Figura A.9. Probabilidad de degradación, escenario 1 – voz y datos.

## A.2. Escenario 2: 0.5Km

### Caso 1: Voz

El histograma obtenido para este caso de simulación se muestra en la figura A.10, donde se aprecia que el número de UE conectados en promedio fue de 195 con una desviación estándar de 19. El valor que más se repitió durante las 1000 simulaciones fue de 190.



**Figura A.10.** Histograma, escenario 2 – voz.

En la figura A.11 se presenta el resultado obtenido, en el cual el número de UE conectados es de 198 lo que corresponde al 66% del total de los UE presentes en el sistema. En esta figura se evidencia como en todas las celdas al menos un UE logra conectarse al sistema, además al comparar este resultado con el obtenido en el caso 1 del primer escenario, se observa una mejora de la capacidad del sistema del 19.67%, esto se debe a que el radio de las celdas se reduce a la mitad por lo que la interferencia intracelda disminuye sustancialmente.

En la figura A.12 se observan las curvas de probabilidad de degradación para cada celda del sistema. Al observar este resultado, se evidencia como el algoritmo no logra estabilizar la probabilidad de degradación de las celdas del sistema debido a que al reducir el radio de las celdas, la interferencia intercelda aumentó.

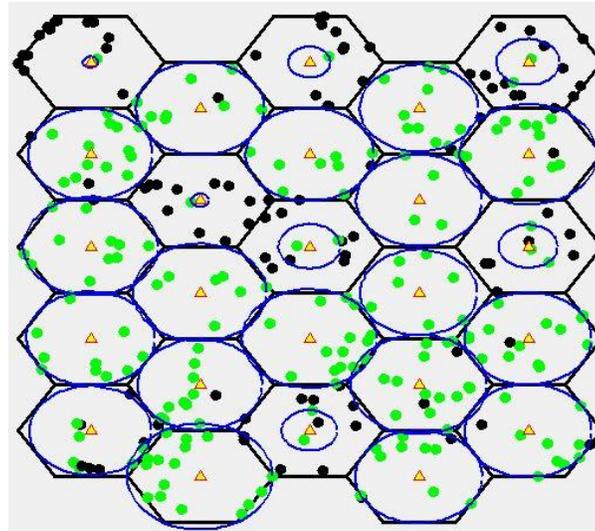


Figura A.11. Resultado obtenido, escenario 2 – voz.

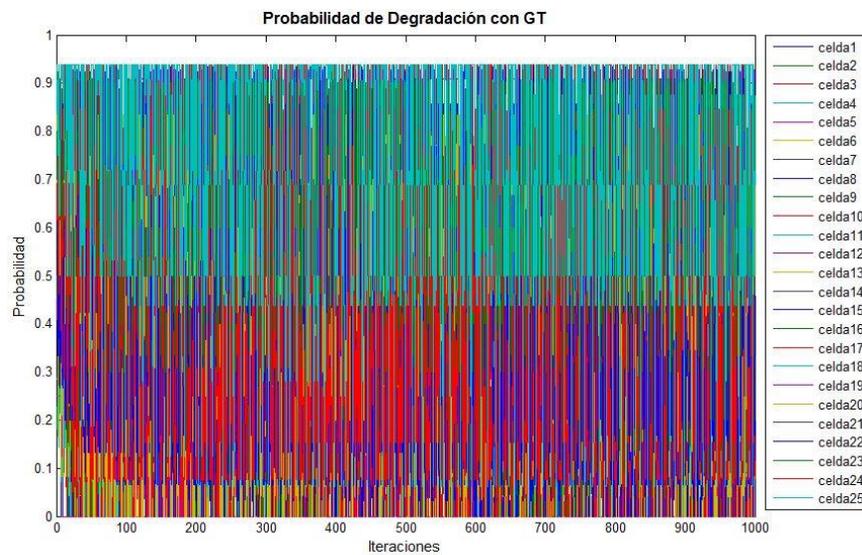


Figura A.12. Probabilidad de degradación, escenario 2 – voz.

## Caso 2: Datos

El histograma de la figura A.13, muestra que para este caso de simulación el número de UE conectados que más se repitió fue de 195 y que el promedio fue de 195 con una desviación estándar de 19.

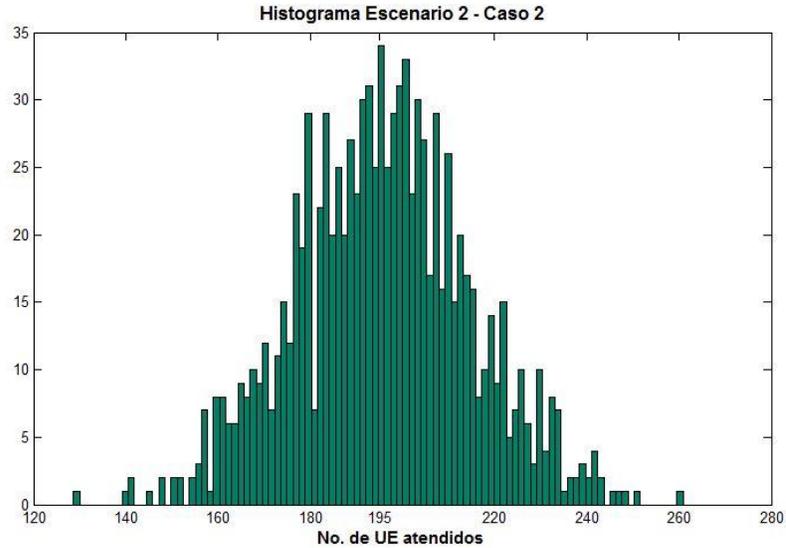


Figura A.13. Histograma, escenario 2 – datos.

De acuerdo con los datos extraídos del histograma, se obtuvo el resultado mostrado en la figura A.14, donde de 300 UE se conectaron 196, lo que corresponde al 65.33%. Este resultado es similar al obtenido en el caso anterior, donde el servicio ofrecido fue voz, a diferencia de los resultados presentados en los casos 1 y 2 del escenario 1 donde los resultados obtenidos con voz fueron diferentes a los obtenidos con datos.

Las curvas de probabilidad de degradación mostradas en la figura A.15, evidencian un mal comportamiento del algoritmo ya que solo unas pocas celdas lograron estabilizar sus probabilidades.

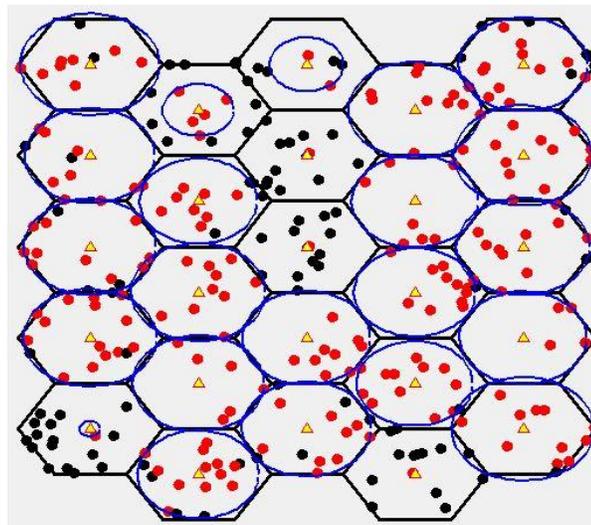


Figura A.14. Resultado obtenido, escenario 2 – datos.

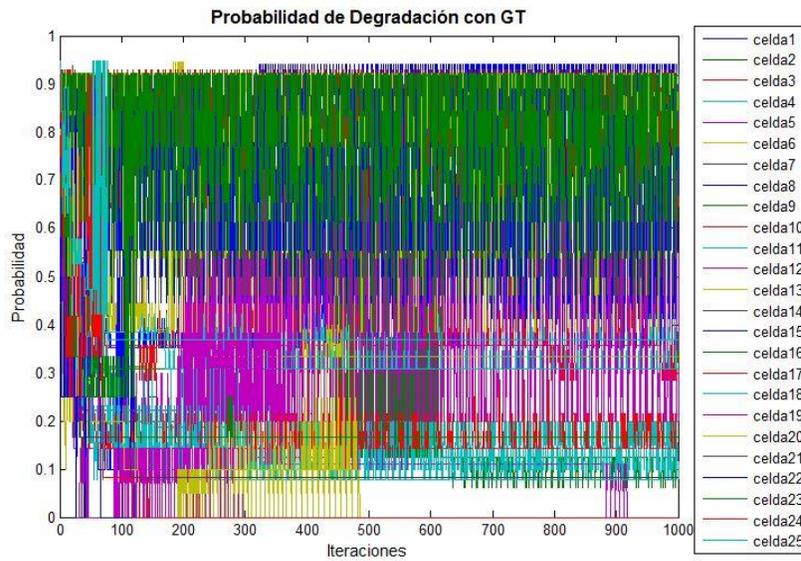


Figura A.15. Probabilidad de degradación, escenario 2 – datos.

### Caso 3: Voz y Datos

Finalmente, el histograma obtenido para el último caso de simulación se muestra en la figura A.16, en el cual el sistema ofreció los servicios de voz y datos simultáneamente. Se observa que el valor que más se repitió fue de 200 UE conectados con un promedio de 201 y una desviación estándar de 24.

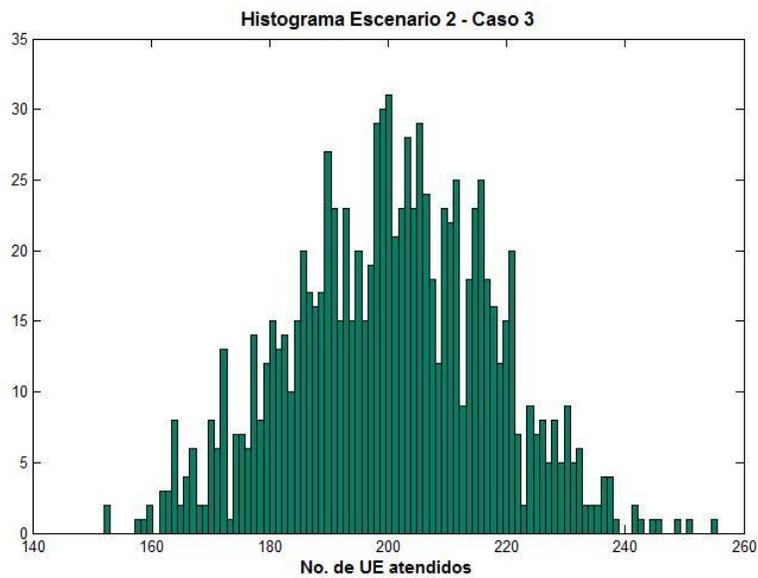


Figura A.16. Histograma, escenario 2 – voz y datos.



Los resultados obtenidos para este caso de simulación se muestran en la figura A.17, donde de 300 UE se conectaron 212, de los cuales 108 se conectaron con voz y 104 con datos, con lo cual la capacidad obtenida fue de 70.66%. Comprando este resultado con los obtenidos en los casos anteriores del escenario 2 y los tres casos del primer escenario, se observa que en este caso se obtuvo la mayor capacidad, sin embargo, las curvas de probabilidad de degradación de la figura A.18, siguieron presentando un mal comportamiento dado que la mayoría de sus celdas no consiguen estabilizar su probabilidad de degradación.

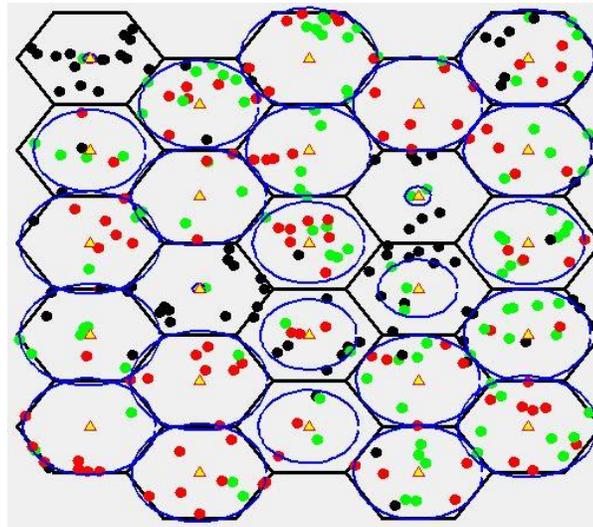


Figura A.17. Resultado obtenido, escenario 2 – voz y datos.

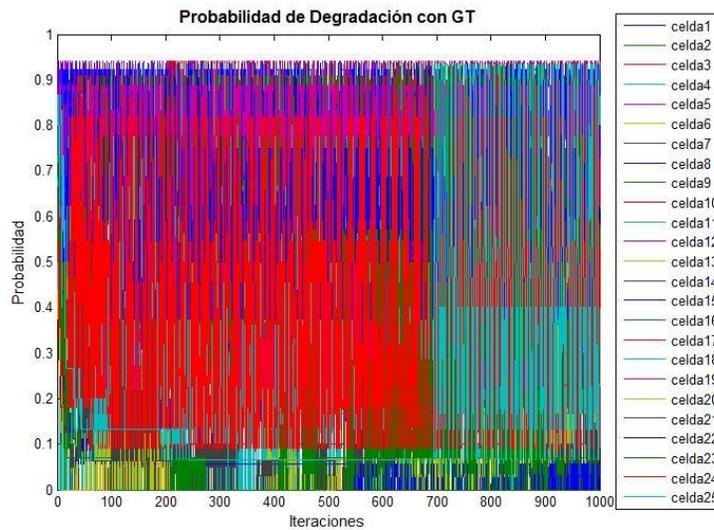


Figura A.18. Probabilidad de degradación, escenario 2 – voz y datos.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

---



## APÉNDICE B

La tabla 13 consigna los resultados obtenidos en los casos de simulación de los escenarios 1 y 2, al realizar la variación del parámetro  $x$  en la expresión de la LR, el cual varía según los siguientes casos:

1. La utilidad obtenida supera el requerimiento de SINR determinado para el servicio pero se encuentra por debajo del umbral establecido por el índice de tolerancia a interferencia.
2. La utilidad obtenida supera el requerimiento de SINR determinado para el servicio pero sobrepasa el umbral establecido por el índice de tolerancia a interferencia.
3. La utilidad obtenida es inferior al requerimiento de SINR determinado para el servicio.

Después de realizar 25 simulaciones para cada escenario, variando el valor de  $x$  para los tres casos anteriores, se encontró que si para el primer caso  $x$  es igual a 5, para el segundo  $x$  es igual a 2 y para el tercero  $x$  es igual a 5, el algoritmo aprende de manera más rápida generando una mayor cantidad de UE conectados en el sistema.

**Tabla 13.** Variación del parámetro  $x$  en los escenario 1 y 2.

Prueba	Escenario 1 (1Km)			
	Voz		Datos	
	1-1-1	5-2-5	1-1-1	5-2-5
1	216	267	85	98
2	195	256	84	85
3	244	272	85	85
4	231	268	77	80
5	218	267	77	85
6	233	259	92	87
7	200	254	70	85
8	240	267	82	98
9	211	248	90	93
10	209	245	81	100
11	228	269	87	94



12	225	258	76	92
13	236	279	85	89
14	221	259	71	94
15	219	254	74	87
16	247	289	79	93
17	254	276	64	89
18	239	268	58	72
19	260	267	77	89
20	253	271	74	94
21	200	251	69	90
22	224	267	90	92
23	196	234	88	91
24	212	243	81	99
25	232	268	77	100
<b>Escenario 2 (0.5Km)</b>				
1	267	298	223	243
2	280	295	233	238
3	285	298	231	246
4	279	294	239	256
5	265	289	223	243
6	280	291	240	258
7	263	295	226	236
8	274	299	235	237
9	289	300	219	225
10	270	290	232	235
11	269	287	241	254
12	265	280	236	247
13	257	285	231	244
14	275	289	237	252
15	264	279	233	249
16	273	294	245	257
17	268	288	237	254
18	272	296	235	258
19	269	293	241	260
20	265	291	237	255
21	255	290	230	269
22	261	289	242	270
23	270	294	221	271
24	261	291	239	250
25	267	297	240	271



## APÉNDICE C

Con el objetivo de determinar el comportamiento de la adaptación realizada a el algoritmo de PC basado en GT, en un sistema de comunicaciones multicelular limitado por interferencia con portadora única, se realizó mil simulaciones del algoritmo, teniendo en cuenta que en cada simulación, el algoritmo se repitió mil veces y además que la posición de los UE cambió en cada simulación.

Los resultados obtenidos para cada caso de simulación se presentan en forma de histogramas, adicionando su media y desviación estándar.

### C.1. Escenario 1: 1Km

#### Caso 1: Voz

En la figura C.1 se muestra que los resultados que más se repiten están en el rango entre 262 y 280, específicamente el histograma tiene como moda 269 UE conectados, su promedio es de 265 UE conectados y su desviación estándar es de 10 UE.

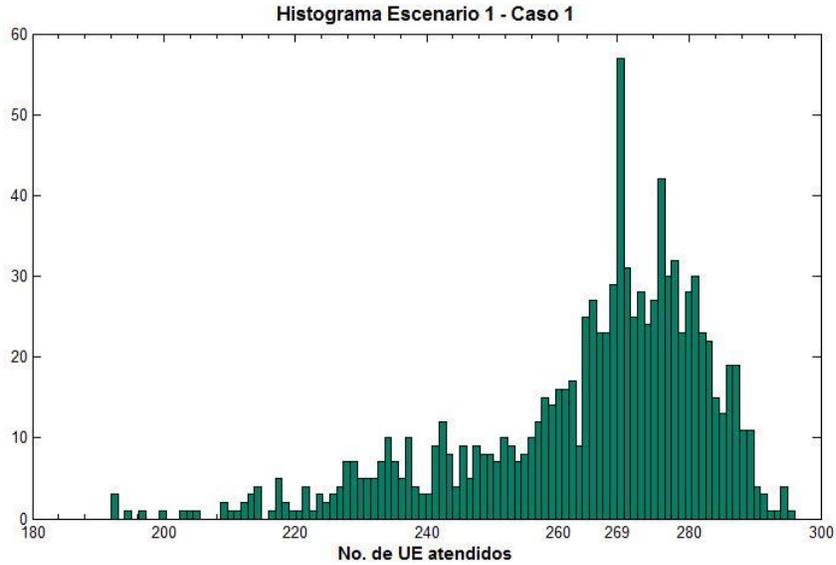


Figura C.1. Histograma, escenario 1 - voz.

## Caso 2: Datos

El histograma de la figura C.2 muestra que los resultados obtenidos para este caso de simulación presentan un comportamiento aleatorio, debido a que estos tienden a formar una campana de Gauss, con una media de 87 UE conectados, una desviación estándar de 5 UE y una moda de 88 UE.

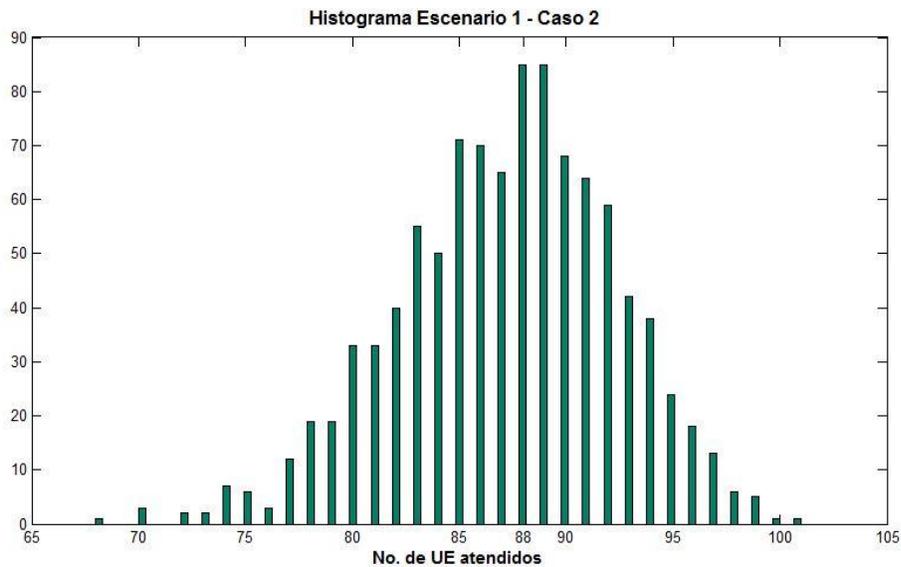


Figura C.2. Histograma, escenario 1 – caso 2.



### Caso 3: Voz y Datos

Los resultados obtenidos al ofrecer simultáneamente los servicios de voz y de datos se muestran en la figura C.3, en donde el histograma presenta un comportamiento intermedio entre el evidenciado en los dos casos anteriores; el cual obtuvo como moda 159 UE conectados, su promedio fue de 162 UE conectados y una desviación estándar de 10 UE.

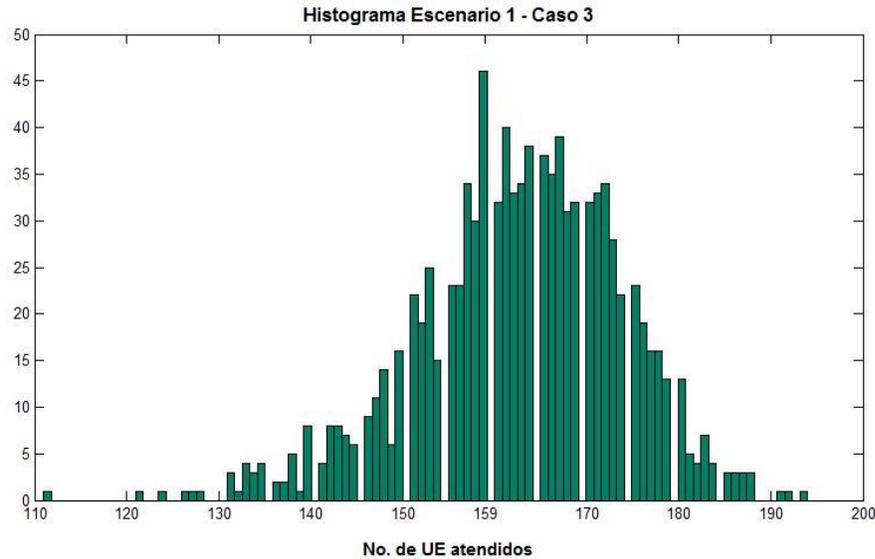


Figura C.3. Histograma, escenario 1 – voz y datos.

## C.2. Escenario 2: 0.5Km

### Caso 1: Voz

Para este caso de simulación no se observa un comportamiento tan aleatorio como en los demás casos según la figura C.4, donde la moda es de 300 UE conectados, en 195 de las mil simulaciones. El histograma obtuvo un promedio de 289 UE conectados y una desviación estándar de 10 UE.

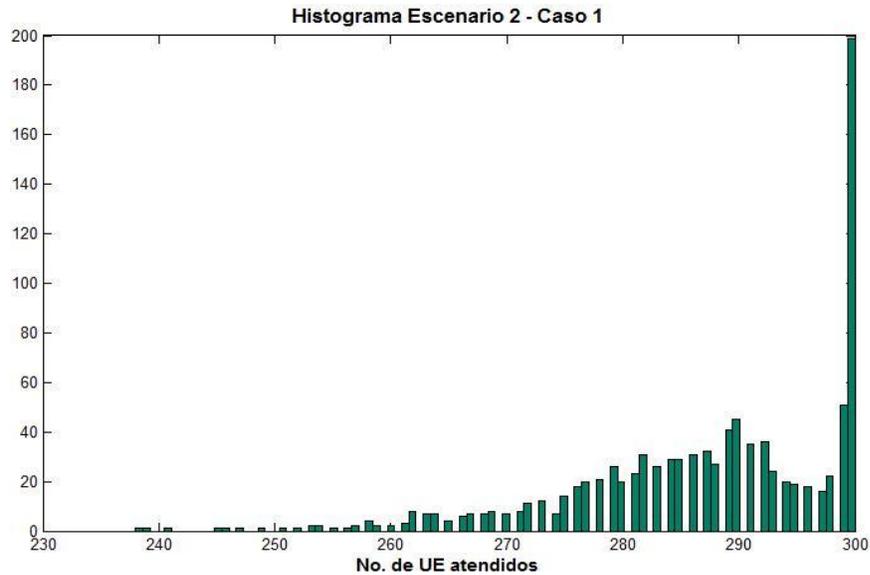


Figura C.4. Histograma, escenario 2 – voz.

## Caso 2: Datos

El Histograma de la figura C.5 muestra un comportamiento aleatorio tendiendo a formar una campana de Gauss, cuyo promedio es de 253 UE conectados, con una desviación estándar de 8 UE y su moda es de 249 UE conectados al sistema.

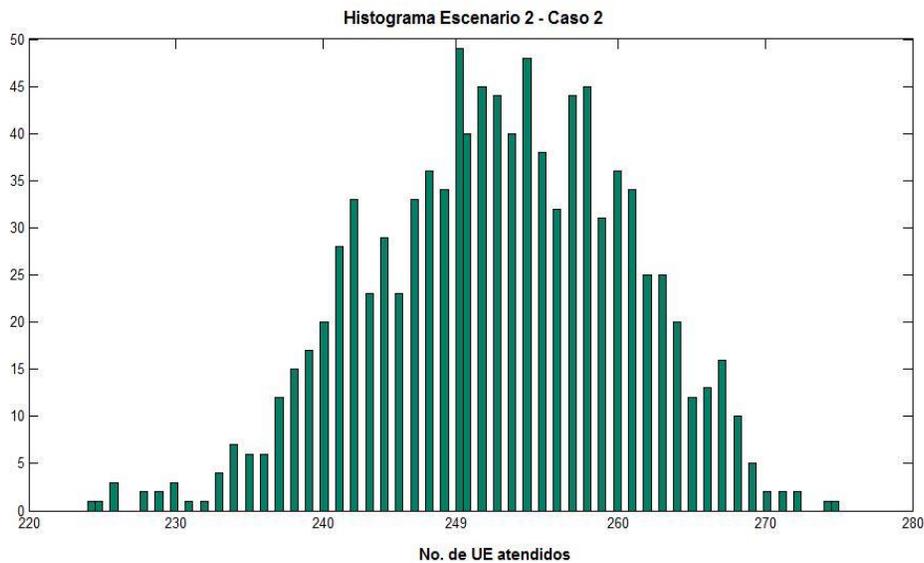


Figura C.5. Histograma, escenario 2 – datos.



### Caso 3: Voz y Datos

Para este caso el sistema ofreció el servicio de voz y datos simultáneamente durante mil simulaciones del algoritmo. Como se observa en la figura C.6, la capacidad obtenida en promedio fue de 290 UE, con una desviación estándar de 7 UE, además el número de UE conectados que más se repitió fue de 297.

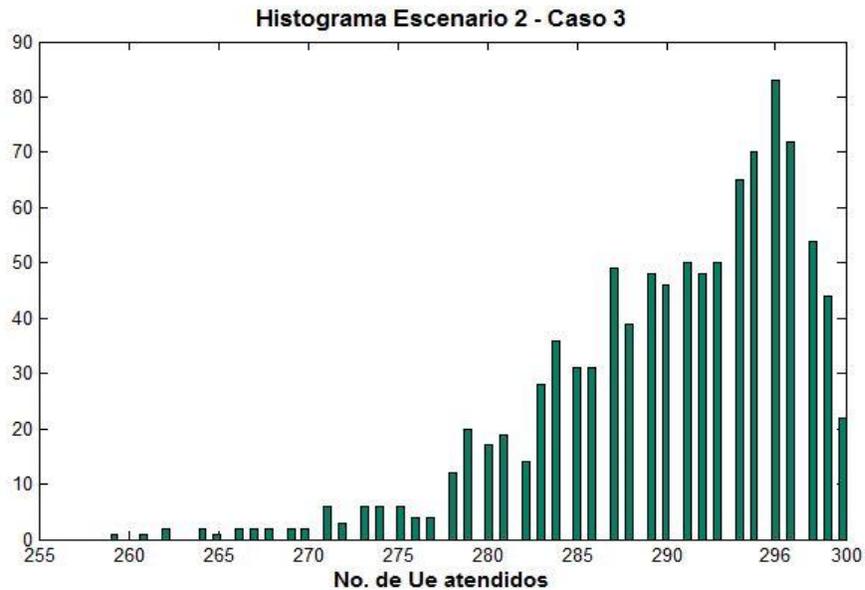


Figura C.6. Histograma, escenario 2 – voz y datos.

Como se observó en los histogramas obtenidos para cada caso de simulación, la desviación estándar no supero los UE conectados, por tanto se puede afirmar que los resultados obtenidos son confiables.



Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.

---



## REFERENCIAS

- [1] V. F. Miramá y V. M. Quintero, «Propagación en canales móviles,» 2014. [En línea]. Available: <https://drive.google.com/a/unicauca.edu.co/file/d/0By2ZoUa3bwqgQUpxei1IM2xVQIU/edit>. [ltimo acceso: 21 Enero 2015].
- [2] A. Goldsmith, «Cellular Systems and infrastructure-Based Wireless Networks,» de *Wireless Communications*, Cambridge University Press., 2005, pp. 205-231.
- [3] L. Hanzo, et Al., 3G, HSPA and FDD Versus TDD Networking, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd. , 2008.
- [4] P. Muszynski y H. Holma, «Introduction to WCDMA,» de *WCDMA FOR UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*, Finlandia, Harri Holma and Antti Toskala, 2004, pp. 47-60.
- [5] A. Pachn, «Evolución de los sistemas móviles celulares GSM,» *SISTEMAS & TELEMTICA*, vol. 2, n 4, pp. 13-45, 2004.
- [6] F. Bari y V. C. Leung, «Automated Network Selection in a Heterogeneous Wireless Network Environment,» *Network IEEE*, vol. 21, pp. 34-40, 2007.
- [7] C. Patel, et Al., «Femtocell and Beacon Transmit Power Self-Calibration,» *Qualcomm*, pp. 1-8, 2010.
- [8] J. Zhang, et Al., «Evolutions Towards Small cell and HetNet,» *RANPLAN Wireless Network Desing*, 2012.
- [9] F. Kuhn, et Al., «Interference in Cellular Networks: The Minimum Membership Set Cover Problem,» *Computing and Combinatorics*, vol. 3595, pp. 188-198, 2005.
- [10] JDSU, «Interference in Cellular Networks: Intermodulation and Frequency Refarming,» *White*



*Paper*, pp. 1-6.

- [11] P. Perinen y S. G. Glisic, «Co-Channel Interference in Digital Cellular TDMA Networks,» de *Encyclopedia of Telecommunications*, Online ISBN: 9780471219286, 2003.
- [12] J. P. Romero, O. Sallent y R. Agustí, «Gestión de Recursos Radio en el marco de los sistemas 3G,» de *Jornadas Telecom I+D*, Madrid, 2002.
- [13] Hughes Systique, «HSCTechnicalWiki,» [En línea]. Available: <http://wiki.hsc.com/Main/UmtsPowerControl>. [Último acceso: 10 Julio 2015].
- [14] A. L. Fernandez, «Evaluación de Mecanismos de Asignación de Base en Redes WCDMA con Limitación de Capacidad en la Red de Transporte,» Proyecto final de carrera, Cataluña, España, 2010.
- [15] V. F. Miramá, «Control de Potencia basado en Teoría de Juegos en Comunicaciones Inalámbricas,» Tesis de Maestría, Popayán, 2012.
- [16] E. Accinelli y D. Vaz, «Introducción a la Teoría de Juegos,» Universidad de la República, Departamento de Economía, 1996, pp. 2-23.
- [17] M. J. Osborne, «An Introduction to Game Theory,» Toronto, Oxford University Press., 2000, pp. 1-53.
- [18] Z. Han, de *Game Theory in Wireless and Communications Networks*, Cambridge University Press., 2012, pp. 1-4.
- [19] A. Brandenburger, «Cooperative Game Theory: Characteristic Functions, Allocations, Marginal Contribution,» 2007.
- [20] S. M. Perlaza, et Al., «Satisfaction Equilibrium: A General Framework for QoS Provisioning in Self-Configuring Networks,» de *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, Miami, 2010.
- [21] S. Ross y B. Chaib-draa, «Learning to Play a Satisfaction Equilibrium,» Laval University, Québec, Canadá.
- [22] L. Raju, et Al., «Reinforcement Learning in Adaptive Control of Power System Generation,» *Procedia Computer Science*, nº 46, pp. 202-209, 2015.
- [23] M. Bowling y M. Veloso, «Multiagent learning using a variable learning rate,» *Artificial*



*Intelligence*, nº 136, pp. 215-250, 2002.

- [24] O. M. Ulgen, et Al., *Simulation Methodology: A Practitioner's Perspective*, Technical Committee on Simulation Methodology: Michigan Simulation User Group.
- [25] European Telecommunications Standards Institute, «Selection Procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS,» Valbonne, Francia, ETSI, 1998, pp. 39-41.
- [26] International Telecommunication Union (ITU), «Attenuation by atmospheric gases,» de *Recomendación ITU-R P 676-10*, ITU, 2013.
- [27] R. Bianchi, et Al., «Transferring knowledge as heuristics in reinforcement learning: A case-based approach,» *Artificial Intelligence*, nº 226, pp. 102-121, 2015.