

VÍCTOR FABIÁN MIRAMÁ PÉREZ



CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN
COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán

2013

VÍCTOR FABIÁN MIRAMÁ PÉREZ

CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN
COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de

Magister en Electrónica y Telecomunicaciones

Director:
Víctor Manuel Quintero Flórez

Popayán
2013

*A Dios por ser la fuerza y la fe
que guía mi camino.*

*A mi abuelo Ángel por su ejemplo
de amor, fuerza y rectitud.*

Agradecimientos

La culminación de esta meta me inspira para agradecer la colaboración y apoyo de muchas personas:

A Dios por rodearme de personas excepcionales y bendecirme todos los días.

Al ingeniero Víctor Quintero por sus inspiradoras ideas, su apoyo, confianza, guía y ejemplo en lo personal y profesional.

Al Doctor Samir Medina Perlaza, por sus inspiradores trabajos, su orientación y recomendaciones.

A mi esposa, por su apoyo, compañía y por el tiempo que no pude dedicarle.

A mi madre porque me dio el impulso cuando las cosas parecían más difíciles en el primer peldaño de mi profesión.

A mi hermana que siempre me apoya y siempre me ve como su hermanito.

A mis amigos, los viejos y los nuevos, que siempre me apoyan y me dan fuerza para seguir adelante.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera hacen parte de en mi vida.

Resumen

Los sistemas de comunicaciones han evolucionado vertiginosamente a lo largo de las últimas décadas, las comunicaciones son cada vez más eficientes y los usuarios requieren de mejores servicios con una alta calidad, sin embargo este crecimiento en los requerimientos implica la utilización de una cantidad considerable de energía, que para los diferentes sistemas de comunicaciones se utiliza de forma ineficiente causando interferencia entre dichos sistemas y un alto consumo de energía en los dispositivos móviles. Por este motivo la Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) implementa dentro de sus procedimientos de gestión, el Control de Potencia (PC, *Power Control*), pretendiendo utilizar de forma adecuada la energía disponible en los dispositivos móviles y en general de todo el sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas. La investigación sobre el Control de Potencia (PC) establece diferentes alternativas para su implementación y modelado, en la investigación se pretende modelar el Control de Potencia (PC) mediante una herramienta matemática conocida como Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*) que ha sido ampliamente utilizada en diferentes áreas, obteniéndose buenos resultados.

Para abarcar esta temática se establece el modelo de Control Ideal de Potencia como punto de referencia, el cual establece la mejor solución para la asignación de potencia en un sistema de comunicaciones. Para la evaluación del modelo se definió como escenario de simulación un sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas limitado por interferencia con única portadora, donde se tiene en cuenta la interferencia causada por los usuarios presentes tanto al interior de la celda como fuera de esta.

Los resultados obtenidos muestran que la Teoría de Juegos (GT) es una alternativa eficiente para el modelado de procedimientos de gestión de recursos en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas.

Palabras Claves: Aprendizaje Reforzado, Control de Potencia, Control Ideal de Potencia, Gestión de Recursos Radio, Teoría de Juegos.

Abstract

The communications systems have evolved dramatically during the last decades, reaching high efficiency and provision of high quality services, however the use of the new capabilities of these systems involves the use of a considerable amount of energy by mobile devices, which can cause interference between the users of these systems. For this reason, the Radio Resource Management (RRM) implements within their procedures, the Power Control (PC), it searches the appropriate use of the power available on mobile devices and over all the mobile and wireless communications systems. Research about the Power Control (PC) provides different alternatives for implementation and modeling, this thesis models the Power Control (PC) using a mathematical tool known as Game Theory (GT), which has been widely used in different areas with good results.

To study this problem, the model of Ideal Power Control was implemented as a reference point, which provides the best solution for power allocation in a communication system. To evaluate the model a simulation scenario of mobile and wireless single carrier communications system limited by interference was defined; it considers the interference caused by the users present both within the cell and outside it.

The results show that Game Theory (GT) is an efficient alternative for resource management procedures modeling in mobile communication systems and wireless networks.

Keywords: Reinforcement Learning, Power Control, Ideal Power Control, Radio Resource Management, Game Theory.

Contenido

	Pág.
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	2
1.2 CONTRIBUCIONES DE LA TESIS.....	3
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	4
CAPÍTULO 2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TEORÍA DE JUEGOS	5
2.1 TEORÍA DE JUEGOS.....	5
2.2 TIPOS DE JUEGO.....	6
2.3 REPRESENTACIÓN DE UN JUEGO	7
2.3.1 Notación	7
2.3.2 Forma Estratégica o Normal	8
2.3.3 Forma Extendida.....	8
2.4 EQUILIBRIO	9
2.4.1 Equilibrio Nash	9
2.4.2 Equilibrio de Satisfacción	11
2.5 APRENDIZAJE REFORZADO.....	12
CAPÍTULO 3 MODELO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS.....	13
3.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA	13
3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA	14
3.2.1 Características del Sistema.....	14
3.2.2 Modelo de Control Ideal de Potencia	16
3.2.3 Modelo Basado en Teoría de Juegos.....	18
3.3 FORMULACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA	21
3.4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	24
3.5 CODIFICACIÓN DEL MODELO	25

3.6 EXPERIMENTACIÓN	25
3.7 VALIDACIÓN DEL MODELO	25
3.8 MONITOREO Y CONTROL	26
CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS	27
4.1 CELDA DE RADIO IGUAL A 1 KM	27
4.1.1 Primer Caso	27
4.1.2 Segundo Caso.....	34
4.1.3 Tercer Caso.....	39
4.2 CELDA DE RADIO 500 M.....	44
4.2.1 Primer Caso	44
4.2.2 Segundo Caso.....	48
4.2.3 Tercer Caso.....	52
4.3 RESUMEN	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	59
5.1 CONCLUSIONES	59
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	60
REFERENCIAS	63

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 3.1 Escenario de Simulación.....	15
Figura 3.2 Diagrama en Bloques del Sistema	21
Figura 3.3 Diagrama de Flujo General del Sistema.....	22
Figura 3.4 Diagrama de Flujo del Control Ideal de Potencia	23
Figura 3.5 Diagrama de Flujo del Control de Potencia basado en Teoría de Juegos	24
Figura 4.1 Escenario de Simulación con Celda de Radio 1 Km	28
Figura 4.2 Resultado del Primer Caso para la Celda de Radio 1 Km.....	29
Figura 4.3 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 493 m.....	30
Figura 4.4 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 687 m.....	30
Figura 4.5 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 142.6 m.....	31
Figura 4.6 Variación de Probabilidades Primeras Iteraciones	32
Figura 4.7 Variación de la SINR para el Primer Caso con Celda de Radio 1 Km.....	32
Figura 4.8 Primer Caso con Control Ideal de Potencia	33
Figura 4.9 Probabilidad de Degradación Primer Caso para GT e IPC	34
Figura 4.10 Resultado del Segundo Caso para la Celda de 1 Km	35
Figura 4.11 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 598.5 m.....	36
Figura 4.12 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 317.4 m.....	36
Figura 4.13 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 626.3 m.....	37
Figura 4.14 Variación de la SINR para el Segundo Caso con Celda de Radio 1 Km	38
Figura 4.15 Resultado del Segundo Caso con Control Ideal de Potencia	38
Figura 4.16 Probabilidad de Degradación Segundo Caso para GT e IPC	39
Figura 4.17 Resultado del Tercer Caso con Celda de 1 Km	40
Figura 4.18 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 540.7 m.....	41
Figura 4.19 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 224.5 m.....	41
Figura 4.20 Variación de la SINR para el Tercer Caso con Celda de Radio 1 Km....	42
Figura 4.21 Resultado del Tercer Caso con Control Ideal de Potencia	43
Figura 4.22 Probabilidad de Degradación Tercer Caso para GT e IPC	43
Figura 4.23 Resultado del Primer Caso con Celda de Radio 500 m	44
Figura 4.24 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 323 m.....	45
Figura 4.25 Acercamiento Sobre las Primeras Iteraciones del Algoritmo.....	45
Figura 4.26 Variación de Probabilidad de Potencia UE al Interior de la MBS	46

Figura 4.27 Variación de SINR Primer Caso Celda de Radio 500 m.....	46
Figura 4.28 Resultado del Primer Caso con Control Ideal de Potencia	47
Figura 4.29 Probabilidad de Degradación Primer Caso para GT e IPC	48
Figura 4.30 Resultado del Segundo Caso con Celda de Radio 500 m.....	49
Figura 4.31 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 280.3 m	49
Figura 4.32 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 130.7 m	50
Figura 4.33 Variación de SINR Segundo Caso Celda de Radio 500 m	50
Figura 4.34 Resultado del Segundo Caso con Control Ideal de Potencia	51
Figura 4.35 Probabilidad de Degradación Segundo Caso para GT e IPC.....	52
Figura 4.36 Resultado del Tercer Caso con Celda de Radio 500 m.....	53
Figura 4.37 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 413 m	53
Figura 4.38 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 342 m	54
Figura 4.39 Variación de SINR Tercer Caso Celda de Radio 500 m.....	55
Figura 4.40 Resultado del Tercer Caso con Control Ideal de Potencia	56
Figura 4.41 Probabilidad de Degradación Tercer Caso para GT e IPC.....	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 3.1 Características del Escenario de Simulación.....	15
Tabla 4.1 Tabla Resumen de Resultados	57

Lista de Acrónimos

3G	Tercera Generación, <i>Third Generation</i> .
3GPP	3rd <i>Generation Partnership Project</i> .
4G	Cuarta Generación, <i>Fourth Generation</i> .
AI	Inteligencia Artificial, <i>Artificial Intelligence</i> .
BR	Mejor Respuesta, <i>Best Response</i> .
ETSI	Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones, <i>European Telecommunications Standards Institute</i> .
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
GT	Teoría de Juegos, <i>Game Theory</i> .
IPC	Control Ideal de Potencia, <i>Ideal Power Control</i> .
MBS	Micro Estación Base, <i>Micro Base Station</i> .
NE	Equilibrios Nash, <i>Nash Equilibrium</i> .
PC	Control de Potencia, <i>Power Control</i> .
QoS	Calidad de Servicio, <i>Quality of Service</i> .
RL	Aprendizaje Reforzado, <i>Reinforcement Learning</i> .
RRM	Gestión de Recursos Radio, <i>Radio Resource Management</i> .
SE	Equilibrio de Satisfacción, <i>Satisfaction Equilibrium</i> .
SINR	Relación Señal a Interferencia más Ruido, <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> .
UE	Equipo de Usuario, <i>User Equipment</i> .

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos crecen rápidamente conforme los avances tecnológicos se van presentando, sin embargo, los recursos radio disponibles siguen siendo limitados: ancho de banda y la potencia de transmisión de los dispositivos móviles. De igual manera el ruido, la interferencia y la variabilidad del canal de comunicaciones, afectan el desempeño de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos. Debido a estas limitaciones es necesaria la definición e implementación de procedimientos que permitan hacer uso eficiente de los recursos radio.

En el campo de las telecomunicaciones se buscan continuamente alternativas para utilizar de manera eficiente los recursos radio, por ello se han definido de manera general diferentes procedimientos de Gestión de Recursos Radio (RRM), los cuales han sido estudiados pero su implementación no ha sido estandarizada.

El uso eficiente de la energía en los sistemas de comunicaciones móviles actuales es de gran importancia, debido a la necesidad de optimizar su uso en dispositivos móviles, porque los servicios ofertados sobre las nuevas tecnologías exigen una mayor Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) y ello está relacionado a la demanda de energía. Por este motivo el interés de esta tesis es el Control de Potencia (PC), dado que como lo muestran diferentes investigaciones (Rose, et al., 2011; Goodman y Mandayam, 2001; Perlaza, et al., 2011, Pillutla y Krishnamurthy, 2008; Xing y Chandramouli, 2008), el control adecuado de potencia, permite reducir la interferencia y con ello incrementar la capacidad y la calidad de un sistema de comunicaciones móviles, aumentar el tiempo de vida útil de las baterías de los dispositivos móviles y reducir el impacto ambiental causado por los desechos tecnológicos (Tembine, et al., 2010; Kakemizu y Chugo, 2009).

Para optimizar el uso de eficiente de la energía en las redes de comunicaciones móviles, existen diferentes alternativas (Calabuig, 2010; Goodman y Mandayam, 2001; Kakemizu y Chugo, 2009) cuyo objetivo es reducir tanto como sea posible el consumo de energía, sin degradar la Calidad del Servicio (QoS) ofrecida, ni causar sobrecarga en el sistema, procurando brindar el servicio a la mayor cantidad de usuarios posible. Una de estas alternativas, aunque no exclusiva para el Control de Potencia (PC), es la Teoría de Juegos (GT), la cual ha tomado gran importancia

debido a los buenos resultados obtenidos en las investigaciones donde se ha aplicado (Adibi y Vakili, 2007; Halder y Song, 2007; Perlaza et al., 2010; Perlaza, Tembine, Lasaulce y Debbah, 2012; Pillutla y Krishnamurthy, 2008). Sin embargo, los conceptos básicos de la Teoría de Juegos (GT) no son adecuados para todos los escenarios, por este motivo, diferentes investigaciones definen modificaciones, adaptaciones o mejoras, ampliando el campo de aplicación de la Teoría de Juegos (GT) (Ross y Chaib-draa, 2006; Xing y Chandramouli, 2008; Lasaulce y Tembine, 2011).

El interés de la presente tesis de maestría es modelar a nivel de sistema y analizar mediante Teoría de Juegos (GT) el Control de Potencia (PC) en un sistema de comunicaciones inalámbrico, teniendo en cuenta una red limitada por interferencia, donde cobra mayor importancia el uso eficiente de la energía, debido a que las comunicaciones de los usuarios coinciden en espacio, tiempo y frecuencia.

1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

Las redes de comunicaciones móviles e inalámbricas han crecido rápidamente a lo largo de las dos últimas décadas, evidencia de ello son las migraciones de los operadores del país a tecnologías de 3G, 3.5G y 4G. Sin embargo, este crecimiento muestra también, que los recursos radio son limitados y que es necesario implementar estrategias de gestión que permitan compartir el espectro y hacer uso de los recursos radio disponibles de manera eficiente, sin que ello implique degradación de la Calidad del Servicio (QoS) ofrecida (Carneiro, et al, 2005; Calabuig, 2010; Rahman, et al., 2007).

La búsqueda de mejores estrategias o diferentes implementaciones de los procedimientos o mecanismos de Gestión de Recursos Radio (RRM), permite abrir espacios de investigación que buscan analizar el Control de Potencia (PC) en los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos actuales y futuros por medio de la aplicación de la Teoría de Juegos (GT), y de esta manera analizar la capacidad de los sistemas, acorde a sus exigencias, necesidades y requerimientos (Koskie y Gajic, 2005).

Es importante profundizar desde diferentes técnicas de modelado y análisis matemático el problema del Control de Potencia (PC) en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos, debido a su relevancia en el desempeño de un sistema de comunicaciones, dado que la Calidad de Servicio (QoS) y la cantidad de interferencia generada por los usuarios del sistema, depende del nivel de potencia de transmisión del terminal de usuario. De igual manera la aplicación de la Teoría de Juegos (GT) es una novedad en el modelado y análisis de diferentes estrategias y/o procedimientos de Gestión de Recursos Radio (RRM) en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos, permitiendo analizar el comportamiento

general de un sistema (Adibi y Vakili, 2007; Meshkati, et al., 2006; Halder y Song, 2007).

Es trascendental el análisis del Control de Potencia (PC), dado el interés que tienen los investigadores de sistemas de última generación y la relevancia de la Gestión de Recursos Radio (RRM) en la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos.

En el área de las comunicaciones móviles e inalámbricas, existe una constante necesidad de mejorar los procesos de asignación de recursos, y continuamente se desarrollan investigaciones que propenden por aplicar herramientas matemáticas para modelar y mejorar dichos procedimientos. Por este motivo y dada la trayectoria de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) se consideró importante apropiarse una de las temáticas que en la actualidad se considera más relevante para el área de las comunicaciones como lo es la Teoría de Juegos (GT).

En la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), tanto en pregrado como posgrado se debe procurar estar a la vanguardia de los estudios que se realizan a nivel mundial, por tal motivo, el presente trabajo de grado busca ser una base para la apropiación de la Teoría de Juegos (GT) para el análisis de diferentes situaciones de conflicto en la Gestión de Recursos en los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas y específicamente en esta tesis en el Control de Potencia (PC).

1.2 CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

Este trabajo ha considerado un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico limitado por interferencia con única portadora, para analizar su capacidad en las condiciones menos favorables, modelando el Control de Potencia (PC) mediante el uso de la Teoría de Juegos (GT) y el Aprendizaje Reforzado (RL, *Reinforcement Learning*). Este último es de especial importancia dado que permite hacer un estudio del entorno y ajustar el sistema para obtener el mejor desempeño posible, cabe anotar que el Aprendizaje Reforzado no hace parte de los objetivos de la tesis, pero se incluye como un alcance extra de la misma.

Para obtener un modelo adecuado para la aplicación de la Teoría de Juegos (GT), se aplicó la metodología para la simulación de sistemas de comunicaciones (Astaiza y Bermúdez, 2007), la cual establece los lineamientos necesarios para un correcto modelado y simulación a nivel de sistema, considerando la potencia que aporta al análisis cada dispositivo de usuario, además para asegurar un correcto modelo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT) se aplicó y adaptó el Equilibrio de Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*) y los criterios de aprendizaje definidos por (Debreu, 1952; Ross y Chaib-draa, 2006, Perlaza et al., 2010, Xing y Chandramouli, 2008). Con el modelo obtenido se analizó la capacidad del sistema, vista como la cantidad de usuarios atendidos al interior de una celda, en

comparación con lo obtenido mediante la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*), la cobertura de celda determinada por el valor aceptable de probabilidad de degradación, considerada como el 5% de usuarios no atendidos del total de usuarios al interior de la celda de análisis.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

- Capítulo 1. Introducción al documento de tesis de maestría.
- Capítulo 2. Conceptos básicos sobre Teoría de Juegos (GT).
- Capítulo 3. Definición del modelo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT).
- Capítulo 4. Pruebas y análisis de la capacidad obtenida con la aplicación de la Teoría de Juegos (GT) al Control de Potencia (PC).
- Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.

CAPÍTULO 2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TEORÍA DE JUEGOS

2.1 TEORÍA DE JUEGOS

La Teoría de Juegos (GT) es una herramienta matemática que modela situaciones de conflicto, contienda o negociación entre diferentes entidades racionales, la cual ha sido utilizada ampliamente para el estudio del comportamiento del mercado en áreas económicas o del comportamiento social y político en áreas sociales, donde las decisiones de cada individuo afectan a todo el conjunto (Rasmusen, 2005; Myerson, 1991; Osborn, Samson y Hamidou, 2011). De igual manera se aplica en sistemas computacionales, para modelar y simular situaciones de contienda en solución de problemas o incluso para la construcción de juegos que requieran el análisis del entorno para tomar decisiones.

Recientemente, la Teoría de Juegos (GT) se ha aplicado en los sistemas de telecomunicaciones, en situaciones donde los conflictos o la competencia por el acceso a recursos es inevitable, como en la utilización del espectro, la potencia de transmisión utilizada, el control de congestión y el control de admisión de usuarios, entre otras, en los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos.

La Teoría de Juegos (GT) fue creada por matemáticos pero pasó mucho tiempo sin que fuese aplicada en alguna área específica o situación real, se dio a conocer gracias a Zermelo (1913) y Borel (Osborne, 2002; Kelly, 2003), pero tomó gran importancia tras la publicación del libro *Game Theory and Economic Behavior* de Neumann y Morgenstern (1944) y más aun con las investigaciones de Jhon Nash (1951). A partir de estos acontecimientos la Teoría de Juegos (GT) se expandió rápidamente por diferentes áreas del conocimiento, incluidos los sistemas computacionales y las comunicaciones.

La Teoría de Juegos (GT) involucra tres conceptos fundamentales: toda situación de conflicto donde las decisiones de unos individuos afecten a otros se considera “juego”; a cada individuo involucrado se le denomina “jugador” y cada jugador cuenta con un conjunto de posibles “acciones” o “estrategias” que puede ejecutar, para su beneficio o el beneficio común; y los jugadores deben estar dotados de un cierto grado de racionalidad o inteligencia porque cada acción que ejecuten debe estar fundamentada en la experiencia o el conocimiento de los posibles resultados. Por lo

tanto, el propósito de la Teoría de Juegos (GT), no es determinar la solución óptima sino definir cuales son los posibles resultados que se pueden dar, de acuerdo a las decisiones de los jugadores.

Para que una situación sea modelada como un juego, se debe identificar cuatro elementos fundamentales, los jugadores, las acciones, los beneficios o posibles resultados y el conocimiento o desconocimiento de la información del juego por parte de los jugadores. En un modelo de juego los beneficios o resultados, se representan por una expresión matemática denominada función de utilidad, la cual realiza una cuantificación del beneficio obtenido por un jugador.

2.2 TIPOS DE JUEGO

En la clasificación de los juegos inicialmente se definen dos grupos extensos: los juegos cooperativos y los juegos no cooperativos.

Juegos cooperativos: en este tipo de juegos, los jugadores toman sus decisiones o ejecutan sus acciones teniendo en cuenta que los jugadores alcancen un beneficio u obtengan parte de un recurso (Saad et al., 2012; Lasaulce y Tembine, 2011).

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 el estado o los beneficios obtenidos por los demás participantes del juego.

Para ajustar el juego a ciertas condiciones o aplicaciones, se extiende esta clasificación dando origen a los siguientes tipos de juegos:

Juegos dinámicos: en este tipo de juegos, los jugadores actúan de manera independiente sin tener en cuenta las acciones ejecutadas por los demás jugadores, sin embargo la toma de decisiones se basa en resultados previos, lo que permite ajustar las estrategias de juego.

Juegos estáticos: a diferencia de los juegos dinámicos, en este tipo de juegos los jugadores desconocen la información del entorno y basan su decisión o acción, en razonamientos previamente establecidos, sin modificar los parámetros definidos con anterioridad, es decir no actualizan los criterios de decisión.

Juego estocástico: un juego estocástico es aquel que asocia el tiempo como un parámetro, de tal manera que en cada instante de tiempo el entorno del juego puede cambiar de forma aleatoria, afectando así, las decisiones o acciones de los jugadores.

Juego no estocástico: los juegos no estocásticos pueden ser ejecutados más de una vez, sin que se altere el entorno del juego, es decir, solo cambian aquellas condiciones que dependen de las decisiones o acciones de los jugadores.

Juego suma cero: en este tipo de juegos la sumatoria de las utilidades de los jugadores debe ser cero o constante, de tal manera que se establece un balance en la asignación del beneficio o recurso. Es decir, si existen algunos ganadores, debe existir una cantidad de perdedores que equilibre las condiciones del juego.

Juego no suma cero: en contraposición a los juegos suma cero, este tipo de juegos no requiere que la sumatoria de las utilidades alcanzadas sea cero.

Juego con información completa: en este tipo de juegos, la información asociada al desarrollo del juego es de conocimiento de todos los jugadores, de tal manera que si existe algún cambio en el estado del juego, este cambio lo conocerán todos los jugadores.

Juego con información incompleta: los juegos de información incompleta son considerados más reales porque los jugadores solo conocen parte de la información o estado del juego, de tal manera que los jugadores toman las decisiones de acuerdo al conocimiento parcial del juego y una métrica de acción.

Estas clasificaciones no son excluyentes, por el contrario, se complementan entre sí para realizar una representación más exacta del juego, procurando abarcar la mayor cantidad de información que le permita a los jugadores ajustar sus decisiones y con ello analizar diferentes situaciones o condiciones.

2.3 REPRESENTACIÓN DE UN JUEGO

La representación matemática de un juego, define los elementos que lo conforman y las condiciones del juego. Existen dos tipos de representaciones generales que se deben tener en cuenta: juegos en forma estratégica o normal y juegos en forma extendida.

2.3.1 Notación

Los vectores o conjuntos que definen el juego son representados con letras mayúsculas con fuente *Gabriola*, los elementos que los conforman se representan con mayúsculas con fuente *Times New Roman*. Aquellos vectores o conjuntos que corresponden a acciones o selección de estrategias se representan con letras minúsculas en negrilla con fuente *Times New Roman* y los escalares correspondientes a los elementos que conforman dichos vectores se representan con letras minúsculas con fuente *Times New Roman*. Las variables de ecuaciones o desigualdades que se presenten en unidades logarítmicas son representadas con letras mayúsculas y las variables que se presenten en unidades lineales se representan con letras minúsculas.

2.3.2 Forma Estratégica o Normal

En la forma normal de representación, el juego está definido por tres conjuntos, como lo muestra la ecuación 2.1.

$$G = (\mathcal{N}, \{A_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}) \quad (2.1)$$

Donde $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ es un conjunto no vacío que representa los jugadores, A_n es un conjunto de estrategias o acciones para cada jugador y u_n es la utilidad obtenida o el beneficio alcanzado por el n -ésimo jugador, al ejecutar la acción $a_n \in A_n$ (Lasaulce y Tembine, 2011; Myerson, 1990).

La representación en forma estratégica se utiliza con frecuencia para la aplicación de la Teoría de Juegos (GT) en sistemas de comunicaciones, debido a que con los parámetros que se definen para el juego se puede abstraer fácilmente las características y condiciones asociadas a un sistema de comunicaciones de móviles e inalámbricas.

Por lo general, en un juego en forma estratégica las decisiones son tomadas simultáneamente sin considerar la evolución en el tiempo para el entorno del juego, sin embargo, es posible representar el juego en forma estratégica, si los jugadores desconocen las decisiones de los participantes del juego.

2.3.3 Forma Extendida

La representación de los juegos en forma extendida se realiza mediante diagramas de árbol, en los cuales existe un orden para la toma de decisiones, de tal manera que un nodo representa un punto de decisión y cada rama del árbol representa las posibles acciones (Myerson, 1990).

La representación en forma extendida se presenta en la ecuación 2.2 (Lasaulce y Tembine, 2011).

$$G = (\mathcal{N}, \mathcal{V}, v_{root}, \pi, \{V_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}) \quad (2.2)$$

Donde $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ es un conjunto que representa los jugadores (conjunto no vacío), \mathcal{V} es el conjunto de nodos o vértices del árbol, v_{root} es el identificador del nodo raíz, π es la función predecesora la cual identifica el nodo previo, V_n es un subconjunto de \mathcal{V} que corresponde a una ruta seguida sobre el árbol y u_n es una función de utilidad para el n -ésimo jugador (Lasaulce y Tembine, 2011; Myerson, 1990).

Las condiciones de este juego implican que las decisiones no se pueden tomar de manera simultánea, sino que por el contrario debe existir un orden de tal manera que para tomar una decisión o ejecutar una acción, el jugador debe conocer toda la historia de las decisiones de sus antecesores.

A pesar de que la forma extensiva puede aportar una mejor especificación del juego, es muy popular la representación estratégica para facilitar la toma de decisiones y los cálculos matemáticos asociados a estas.

2.4 EQUILIBRIO

La aplicación de la Teoría de Juegos (GT) como herramienta de modelado, procura predecir el comportamiento de los jugadores o administrar las acciones o estrategias que se deben ejecutar; sin embargo, no todas las acciones o estrategias son benéficas para todos los jugadores, tal que la decisión de uno puede alterar los beneficios alcanzados por otros jugadores, siendo necesario identificar aquellas estrategias o acciones que son adecuadas o deseadas por los jugadores (Osborne, 2002; Perlaza, et al., 2010; Lasaulce, y Tembine, 2011).

Al interior del estudio de la Teoría de Juegos (GT) se definieron varias alternativas para dar solución a un problema representado como un juego. Una de las más importantes definiciones fue la establecida por Jhon Nash (1952) en la cual establece la existencia de puntos de equilibrio dentro de la ejecución de las acciones o decisiones de los jugadores, a los que se denominó en su honor Equilibrios Nash (NE, *Nash Equilibrium*). A partir de los postulados de Nash, se ha dado origen a múltiples soluciones, sin embargo, se resalta por la aplicación y conveniencia para la presente tesis, el Equilibrio de Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*), el cual será explicado posteriormente (Perlaza, et al., 2010; Perlaza, Tembine, Lasaulce y Debbah, 2012; Ross y Chaib-draa, 2006).

2.4.1 Equilibrio Nash

En un juego en forma normal para una situación dada, el conjunto de todas las acciones ejecutadas o decisiones tomadas por parte de los jugadores constituye un perfil de acción $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_N\} \in A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N$, de tal manera que para un jugador n se puede definir la Mejor Respuesta (BR, *Best Response*) según las estrategias del resto de jugadores como lo indica la ecuación 2.3 (Perlaza, et al., 2010; Lasaulce y Tembine, 2011).

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

Donde \mathbf{a}_{-n} representa el perfil de acción de todos los jugadores a excepción del n -ésimo jugador y la expresión se entiende como la acción del usuario n que hace que la utilidad obtenida se maximice cuando los demás jugadores juegan las acciones contenidas en \mathbf{a}_{-n} .

De esta manera el Equilibrio Nash (NE) queda definido como:

Definición: dado el juego en forma estratégica $G = (\mathcal{N}, \{A_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}})$, un perfil de acción \mathbf{a}^* representa un Equilibrio Nash (NE) si (Perlaza, et al., 2010; Lasaulce y Tembine, 2011):

$$\mathbf{a}^* \in BR(\mathbf{a}^*) \quad (2.4)$$

Lo cual representa que las acciones contenidas en \mathbf{a}^* generan la mejor respuesta del juego, de manera más general, el Equilibrio Nash (NE) tiene la siguiente definición:

Definición: dado el juego en forma estratégica $G = (\mathcal{N}, \{A_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}})$, un perfil de acción $\mathbf{a}^* = (a_n^*, \mathbf{a}_{-n}^*)$ representa un Equilibrio Nash (NE) si se cumple la desigualdad 2.5.

$$u_n(a_n^*, \mathbf{a}_{-n}^*) \geq u_n(a_n, \mathbf{a}_{-n}^*), \forall n \in \mathcal{N}, \forall a_n \in A_n \quad (2.5)$$

Con esta definición se puede notar que en condición de Equilibrio Nash (NE), ningún jugador puede obtener una mejor utilidad o beneficio por el cambio unilateral o egoísta de su acción, dado que si él cambia su acción afectará la utilidad de los demás participantes del juego. Sin embargo, es posible que varios jugadores cambien de acción, de tal manera que se satisfaga 2.5, por lo tanto en un juego puede existir más de un Equilibrio Nash (NE) (Perlaza, et al., 2010; Lasaulce y Tembine, 2011).

Una condición más estricta en el Equilibrio Nash (NE), se da cuando en la desigualdad 2.5 se cambia \geq por $>$ causando incluso la no existencia de un equilibrio, dado que un usuario de manera egoísta puede seleccionar la acción más favorable para él, que satisfaga 2.5, causando un detrimento en la utilidad que alcanzan los demás jugadores, por este motivo es necesario tener en cuenta otro tipo de equilibrio.

2.4.2 Equilibrio de Satisfacción

En los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas, la función de utilidad puede representar parámetros como la Calidad de Servicio (QoS), la velocidad de transmisión de datos, el retardo en transmisión, la capacidad del sistema o cualquier otro parámetro cuantificable que pueda interpretarse como beneficio en la comunicación del usuario (Perlaza, et al., 2010; Perlaza, Tembine, Lasaulce y Debbah, 2012; Ross y Chaib-draa, 2006). Desde la perspectiva del operador no es necesario maximizar dicho beneficio, basta con que el servicio supere el mínimo valor de calidad aceptable. Siendo así, el concepto del Equilibrio Nash (NE) no es directamente aplicable a este tipo de sistemas, dado que el Equilibrio Nash (NE) busca la maximización del beneficio alcanzado por el jugador, lo que causaría en el sistema de comunicaciones una utilización excesiva y egoísta de los recursos disponibles.

Para este tipo de sistemas, investigaciones como las de Ross y Chaib-draa (2006), Rose y Perlaza (2011), Perlaza, et al. (2012), aplican un nuevo tipo de equilibrio denominado Equilibrio de Satisfacción (SE), en el cual se busca que los jugadores superen un mínimo beneficio procurando que una mayor cantidad de jugadores puedan obtener algún tipo de beneficio.

Ross y Chaib-dra (2006) introducen el principio de satisfacción, en el cual aquellos individuos que satisfacen sus requerimientos u obtienen el mínimo beneficio aceptable, no querrán cambiar su estrategia, mientras que aquellos que aun no han satisfecho sus necesidades seguramente cambiaran de estrategia, alcanzando si es posible una condición de equilibrio, cuando todos los individuos involucrados en el juego alcancen por lo menos el mínimo beneficio aceptado.

De esta manera para aplicar el concepto del Equilibrio de Satisfacción (SE), puede redefinirse el juego con la tupla $G = (\mathcal{N}, \{A_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{f_n\}_{n \in \mathcal{N}})$ donde f_n representa la función de satisfacción que establece el mínimo beneficio obtenido para el usuario n .

Definición: dado el juego en forma normal $G = (\mathcal{N}, \{A_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{f_n\}_{n \in \mathcal{N}})$ un perfil de acción \mathbf{a}^+ representa un Equilibrio de Satisfacción (SE) si (Perlaza, et al., 2010; Lasaulce y Tembine, 2011):

$$a_n^+ \in f_n(\mathbf{a}_{-n}^+) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (2.6)$$

Tal que $f_n(\mathbf{a}_{-n}) = \{a_n \in A_n : u_n(a_n, \mathbf{a}_{-n}) \geq \Gamma_n\}$, donde Γ_n corresponde al umbral de la función de utilidad. Que se entiende como la acción a_n^+ en conjunto con las acciones del resto de jugadores, satisfacen las condiciones impuestas para la función de utilidad.

2.5 APRENDIZAJE REFORZADO

El Aprendizaje Reforzado (RL) es un área de la computación o de la robótica, específicamente de la Inteligencia Artificial (AI, *Artificial Intelligence*), la cual estudia el comportamiento de los agentes, es decir estudia como un agente debe tomar decisión es que le permitan sacar el mejor provecho o recompensa, de acuerdo con las condiciones del entorno que lo rodea (Sing y Bertsekas, 1996).

Con relación a la Teoría de Juegos (GT), los jugadores se consideran racionales cuando al aplicar las métricas de aprendizaje, asocian la utilidad obtenida a la acción ejecutada, de tal manera que el Aprendizaje Reforzado (RL), permite que cada jugador actualice su estrategia de acuerdo a las variaciones del entorno. Se considera importante dentro del desarrollo de la tesis porque la inclusión del Aprendizaje Reforzado (RL) permite seleccionar de manera dinámica y aproximada los niveles de potencia de transmisión que estabilicen el desempeño del sistema de comunicaciones móviles e inalámbrico (Sing y Bertsekas, 1996; Lasaulce, y Tembine, 2011).

CAPÍTULO 3 MODELO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS

En este capítulo se presenta la definición del modelo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT), en el cual se describen los procesos fundamentales que se llevan a cabo durante la ejecución del algoritmo definido. Para la definición del modelo se adoptó la Metodología para la Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones (Astaiza y Bermúdez, 2007), la cual define una serie de etapas que permiten obtener el modelo de simulación. Las etapas que tiene en cuenta la metodología son: definición del sistema, análisis del sistema, formulación del modelo, selección del lenguaje, codificación del modelo, validación del modelo, experimentación, implantación, monitoreo y control.

3.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Para la obtención del modelo se definió una simulación a nivel de sistema¹, que corresponde a un sistema de comunicaciones limitado por interferencia de única portadora² en el cual se tiene un escenario de dimensiones 4 Km x 4 Km, en el cual se ubican 300 usuarios de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme. En dicho escenario, se analiza el enlace de subida (UL, *Up Link*) para una microcelda de radio 1 Km y 0.5 Km, siendo este enlace altamente afectado por la interferencia generada al interior y exterior de la celda. El análisis se concentra en la celda que se encuentra en el centro del escenario, considerando interferencia intracelda e intercelda; la potencia de los usuarios asociados a otras celdas generan la interferencia intercelda que experimenta cada comunicación de los usuarios que se encuentran al interior de la celda de análisis.

Para el análisis de capacidad, vista como la cantidad de usuarios atendidos simultáneamente en una celda, se definen dos Relaciones Señal a Interferencia más

¹ En una simulación a nivel de sistema se modela el comportamiento de tráfico y movilidad de los UE, cada enlace se representa mediante una caracterización del nivel de enlace (Mendo, 2001).

² En un sistema limitado por interferencia de única portadora, todas las comunicaciones de los usuarios se realizan sobre la misma portadora generando un nivel de interferencia elevado y por ende valores de SINR negativos.

Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) objetivo, correspondientes a -20 dB y -14 dB³.

3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA

En esta etapa se realiza la descripción analítica de los elementos que conforman el sistema y la implementación de la Teoría de Juegos (GT) en el sistema definido.

3.2.1 Características del Sistema

Se considera al interior del escenario el conjunto $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ de Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*) que se encuentran en un sistema microcelular limitado por interferencia y el conjunto $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\} \in \mathcal{M}$ de UE que se encuentran asociados a la Micro Estación Base (MBS, *Micro Base Station*) de análisis, la cual opera sobre una frecuencia de portadora única, como lo muestra la figura 3.1.

La MBS coordina la operación del sistema proporcionando a cada UE la información necesaria para su autoconfiguración. Se define el conjunto \mathcal{P}_n que representa las posibles estrategias para el n -ésimo UE al interior de la microcelda, tal que el conjunto de todas las acciones tomadas en un instante, por parte de cada UE, define el perfil de acción en una variable de tiempo discreta $t \in \{1, 2, \dots, \infty\}$, representado por el vector $\mathbf{p} = \{p_1, \dots, p_N\} \in \mathcal{P}$, con $\mathcal{P} = \mathcal{P}_1 \times \dots \times \mathcal{P}_N$.

Además se define el conjunto $\mathcal{F} = \{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N\}$, que representa la mínima utilidad requerida por cada uno de los UE.

³ Estos valores se tomaron teniendo en cuenta valores típicos de sistemas limitados por interferencia en los cuales la SINR es negativa.

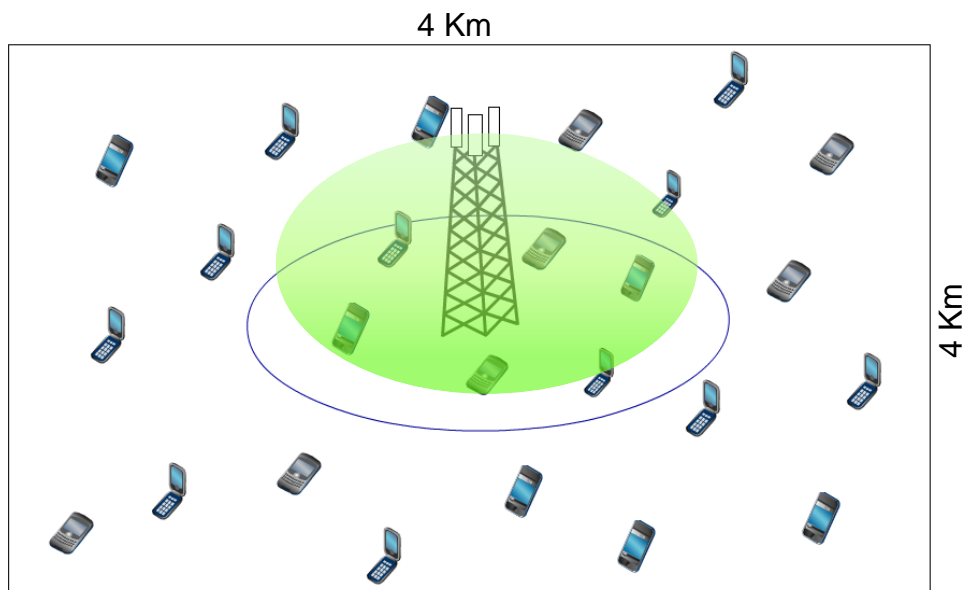


Figura 3.1 Escenario de Simulación

Para el canal de comunicaciones se utilizó el modelo de propagación para ambientes interiores, exteriores y peatonales (ETSI, 1998); y una variable aleatoria con distribución normal, que representa el desvanecimiento por sombra presente en el sistema, de tal modo que las pérdidas de propagación L , quedan representadas por la ecuación 3.1.

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

Donde d es la distancia de un UE hasta la estación base de análisis dada en kilómetros, f es la frecuencia de operación del sistema en unidades de MHz y D es la variable aleatoria que representa el desvanecimiento por sombra, dada en decibeles.

Para el enlace de cada usuario con la MBS se asume por facilidad de análisis una ganancia de antena del móvil despreciable (0 dBi) y la ganancia de las antenas de la MBS se considera igual a 20 dBi , con patrón de radiación omnidireccional tanto para la MBS como para los UE. En la tabla 3.1 se presenta un resumen de las características del escenario de simulación.

Tabla 3.1 Características del Escenario de Simulación

Característica	Valor
Dimensión del Escenario	4 Km x 4 Km
Radio de Celda	1 Km y 0.5 Km
Frecuencia de Operación	900 MHz
Requerimientos de SINR	-20 dB y -14 dB

Potencias de Transmisión	23 dBm, 20 dBm, 17 dBm, 14 dBm, 11 dBm, 8 dBm, 5 dBm, 2 dBm, -1 dBm y $-\infty$ dBm ⁴ .
Cantidad de UE	300
Ganancia de antena de la MBS	20 dBi
Patrón de Radiación MBS	Omnidireccional
Ganancia de antena de los UE	0 dBi
Patrón de radiación de los UE	Omnidireccional
Ancho de banda ⁵	3.84 MHz
Potencia de Ruido Térmico	-101.75 dBm
Figura de Ruido	7.4 dB

3.2.2 Modelo de Control Ideal de Potencia

Para establecer un punto de comparación para la aplicación de la Teoría de Juegos (GT) en el sistema definido, se aplica en dicho sistema el Control Ideal de Potencia (IPC) descrito por Mendo (2001) y Quintero (2010).

El Control Ideal de Potencia (IPC) busca igualar la potencia de recepción que percibe la MBS de todos los UE a los cuales les proporciona un determinado servicio, independiente de la distancia a la cual se encuentren, procurando evitar problemas de interferencia causada por los usuarios cercanos a la MBS (Mendo, 2001). Para la implementación del Control Ideal de Potencia (IPC), se debe identificar la SINR requerida por el servicio específico al usuario i , la cual se muestra en la ecuación 3.2.

$$\text{sinr}_i = \frac{\alpha_i p_{ii}}{\eta + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j p_{ij}}, \quad i, j \in N \quad (3.2)$$

Donde α_i corresponde a la ganancia del sistema⁶ que experimenta la comunicación del usuario i , p_{ii} es la potencia de transmisión del dispositivo móvil i -ésimo, η es la potencia de ruido térmico presente en el sistema y N es el número de usuarios presentes al interior de la celda de análisis.

Para el análisis del Control de Potencia (PC) que se lleva a cabo en la estación base, se toma el sistema de ecuaciones originado por la SINR que se experimenta en cada comunicación, planteando el sistema de ecuaciones 3.3.

⁴ Corresponde a un valor de potencia de transmisión por debajo del mínimo permitido.

⁵ Este valor se tomo como referencia para el cálculo de la potencia de ruido teniendo en cuenta el sistema WCDMA (UMTS) el cual es un sistema limitado por interferencia y en algunos casos de única portadora.

⁶ Esta ganancia del sistema considera las pérdidas y ganancias que experimenta la señal durante el trayecto que une el transmisor con el receptor.

$$\begin{aligned}
\eta_1 + \sum_{j=1, j \neq 1}^N \alpha_j p_{1j} &= \frac{\alpha_1 p_{11}}{\text{sinr}_1}, \\
\eta_2 + \sum_{j=1, j \neq 2}^N \alpha_j p_{2j} &= \frac{\alpha_2 p_{22}}{\text{sinr}_2}, \\
&\vdots \\
\eta_N + \sum_{j=1, j \neq N}^N \alpha_j p_{Nj} &= \frac{\alpha_N p_{NN}}{\text{sinr}_N}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

En el sistema de ecuaciones 3.3 se define $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_N\}$ como un vector de dimensión $1 \times N$, $\eta = \{\eta_1, \dots, \eta_N\}$ como un vector de ruido térmico de dimensión $N \times 1$, $\text{SINR} = \{\text{sinr}_1, \dots, \text{sinr}_N\}$ un vector de orden $N \times 1$ que contiene el requerimiento de calidad de la comunicación de cada usuario y $P = \{p_{11}, p_{12}, p_{13}, \dots, p_{NN}\}$ un vector que contiene la potencia de transmisión necesaria para satisfacer la SINR requerida y que se convierte en el vector de incógnitas del sistema de ecuaciones representado por 3.4.

$$\begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{\text{sinr}_1} & \cdots & -\alpha_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_1 & \cdots & \frac{\alpha_N}{\text{sinr}_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{11} \\ \vdots \\ p_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Así, el sistema queda expresado en función de un sistema lineal de ecuaciones que permite determinar la potencia de transmisión de cada uno de los usuarios teniendo en cuenta todo el conjunto, generando la descripción del sistema definida por la ecuación 3.5.

$$AP = \eta \tag{3.5}$$

Donde A es una matriz de dimensión $N \times N$, definida por la ecuación 3.6 (Mendo, 2001).

$$A = \begin{cases} -\alpha_j & i \neq j \\ \frac{-\alpha_i}{\text{sinr}_i} & i = j \end{cases}, \quad \forall i, j \in N \tag{3.6}$$

Asumiendo⁷ que la matriz A es no singular⁷, la potencia de transmisión de los usuarios está dada por la ecuación 3.7.

$$P = A^{-1}\eta \tag{3.7}$$

⁷ Matriz no singular es aquella para la cual su matriz inversa existe.

Este resultado asigna a cada dispositivo móvil la potencia con la cual debe transmitir, sin embargo, el cálculo de potencia no diferencia los usuarios que se encuentran al interior de la celda de aquellos asociados a otra celda, por lo tanto es necesario adecuar este resultado para incluir la interferencia intercelda. Para esto se consideró de manera independiente la interferencia generada por los usuarios fuera de la celda y se desarrolló el sistema de ecuaciones de la ecuación 3.8.

$$s\text{inr}_i = \frac{\alpha_i p_{ii}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j p_{ij}}, \quad i, j \in N \quad (3.8)$$

Donde i_0 es un escalar que representa la interferencia en la estación base de análisis, proveniente de los usuarios fuera de la celda, el cual se indica en la ecuación 3.9.

$$i_0 = \sum_{m=N+1}^M \alpha_m p_{tm} \quad (3.9)$$

De esta manera el sistema de ecuaciones lineales queda como lo muestra la ecuación 3.10.

$$AP = \eta + l_0 \quad (3.10)$$

Donde $\eta + l_0$ corresponde a un vector de ruido más interferencia. Y la solución al sistema de ecuaciones se muestra en la ecuación 3.11.

$$P = A^{-1}(\eta + l_0) \quad (3.11).$$

Este resultado se implementó en el escenario de simulación, estableciendo el punto de referencia requerido para la comparación con el modelo basado en Teoría de Juegos (GT).

3.2.3 Modelo Basado en Teoría de Juegos

Para modelar el Control de Potencia (PC) en el sistema, se utiliza una representación como juego estratégico no cooperativo que se desarrolla en cada instante de un tiempo discreto t , denotado como $G = (\mathcal{N}, \{P_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}, \{f_n\}_{n \in \mathcal{N}})$, donde \mathcal{N} representa al conjunto de usuarios al interior de la microcelda, P_n es el conjunto de estrategias para el usuario n , que corresponde a un conjunto discreto de 10 potencias utilizables por el UE, cuyos valores se encuentran entre -1 dBm y 23 dBm tomados en pasos de 3dB (3GPP, 2012), u_n es el beneficio obtenido por el UE n al

aplicar una estrategia $p_n \in \mathcal{P}_n$ o también llamado función de utilidad, dado por la ecuación 3.12, correspondiente a la SINR alcanzada por cada UE.

$$u_n(p_n) = \text{sinr}_n = \frac{\alpha_n p_n}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq n}^N \alpha_j p_{ij}}, \quad \forall n, j \in \mathcal{N} \quad (3.12)$$

Donde α_n corresponde a las ganancias del sistema que tienen en cuenta el modelo de propagación y el desvanecimiento por sombra presente en el canal modelado como una variable aleatoria con distribución normal, η es la potencia de ruido térmico e i_0 es la interferencia causada por los UE fuera de la microcelda de análisis, obtenida mediante la ecuación 3.13.

$$i_0 = \sum_{j=N+1}^M \alpha_j p_{ij} \quad (3.13).$$

f_n es la función de satisfacción impuesta para cada comunicación, definida por la ecuación 3.14.

$$f_n = \{p_n \in \mathcal{P}_n : u_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (3.14)$$

Donde cada usuario busca, con la potencia o estrategia seleccionada, alcanzar o superar ligeramente el umbral Γ_n de SINR establecido para su servicio.

Para cada instante de tiempo t , el UE selecciona una potencia de acuerdo con un conjunto de probabilidades $\pi_n(t) = \{\pi_{n,1}(t), \dots, \pi_{n,|p_n|}(t)\}$, que tienen una correspondencia uno a uno con los elementos de \mathcal{P}_n , para el UE n .

El desarrollo del procedimiento de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT) se ejecuta de acuerdo a los siguientes pasos:

1. En el instante $t = 0$, cada UE selecciona una potencia de transmisión inicial de acuerdo al elemento con mayor probabilidad, dentro del conjunto $\pi_n(0) = \{\pi_{n,1}(0), \dots, \pi_{n,|p_n|}(0)\}$, cuyos valores iniciales son seleccionados de manera arbitraria de tal manera que la suma de todos ellos sea igual a uno. Estos valores de probabilidad están directamente relacionados con las potencias de transmisión establecidas para el sistema. La MBS determina la utilidad alcanzada con la estrategia seleccionada y envía este dato al UE para que este actualice sus estrategias.
2. Para $t > 0$, retomando y adaptando lo establecido por Perlaza et al. (Xing y Chandramouli, 2008; Bennis, M. y Pelaza S. 2011), relacionado con el

Aprendizaje Reforzado (RL), cada UE calcula un valor $b_{n,t}$, que define el tamaño del paso en la actualización de la probabilidad de una determinada acción, dado por la ecuación 3.15.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + u_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (3.15)$$

Donde M_n corresponde al valor máximo que puede tomar la función de utilidad, $u_{n,t-1}$ es la utilidad o SINR obtenida en el instante anterior y Γ_n es la mínima SINR requerida por el usuario n , esta variable crece a medida que la $u_{n,t-1}$ se aleja de Γ_n , propiciando un cambio grande en la probabilidad.

3. Con este resultado se actualizan los valores de probabilidad $\pi_n(t)$ para todas las posibles potencias de transmisión del usuario n , de acuerdo a la ecuación 3.16.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)) & \text{si } \beta \geq u_{n,t} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)) & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3.16)$$

Donde β depende de la tolerancia del sistema a la interferencia y $\forall n \in \mathcal{N}$ se tiene lo establecido en las ecuaciones 3.17 y 3.18.

$$g'(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t)=p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (3.17)$$

$$g(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t) \neq p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (3.18)$$

y $\lambda_{n,t} = \frac{1}{t+1}$ es la tasa de aprendizaje para cada UE (Perlaza, S. et al., 2010).

Se puede notar de las ecuaciones 3.17 y 3.18, que si la SINR se encuentra en el rango permitido, la probabilidad de la potencia que utiliza el UE se incrementa manteniendo la estrategia tomada por dicho UE, y la inclusión de la variable β implica un reajuste en la definición del Equilibrio de Satisfacción (SE).

Definición: un perfil de acción $\mathbf{p}^* = \{p_1^*, \dots, p_N^*\} \in \mathcal{P}$, representa un Equilibrio de Satisfacción (SE) si para una función de satisfacción $f_n(\mathbf{p})$ se cumple la ecuación 3.19.

$$f_n(\mathbf{p}^*) = \{p_n^* \in \mathcal{P}_n : \beta + \Gamma_n \geq u_n(p_n^*) \geq \Gamma_n\} \forall n \in \mathcal{N} \quad (3.19)$$

Si la utilidad alcanzada no se encuentra en el rango adecuado, la probabilidad de la potencia seleccionada por el UE disminuye y la probabilidad del resto de potencias se incrementa causando que el UE actualice sus estrategias.

Este procedimiento se realiza para todos los UE asociados a la MBS, hasta alcanzar el número máximo de usuarios dentro de la celda de análisis.

3.3 FORMULACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA

Para la implementación de los procedimientos establecidos en el apartado anterior, se definió el diagrama en bloques mostrado en la figura 3.2, el cual representa los elementos esenciales a tener en cuenta en el sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas limitado por interferencia de única portadora.

Al ser una simulación a nivel de sistema tipo estático, el procedimiento que se describe a continuación se repite para cada uno de los UE presentes en el sistema.

El sistema inicia con la transmisión de una señal por parte de los UE presentes al interior (UE_i) y exterior (UE_o) de la celda de análisis, aplicando antes de llegar a la MBS los efectos de atenuación y desvanecimiento del canal, la MBS atiende a los UE asociados a su celda e identifica como interferencia la señal de los otros UE del sistema. La MBS implementa los procesos necesarios de Control Ideal de Potencia (IPC) y de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT).

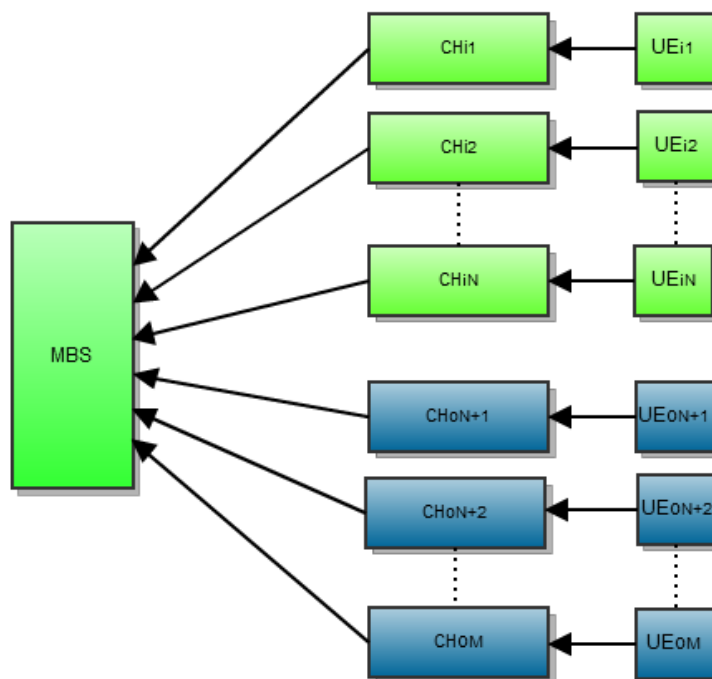


Figura 3.2 Diagrama en Bloques del Sistema

De acuerdo a la interacción de los elementos que componen el diagrama en bloques mostrado en la figura 3.2 se definieron procedimientos que se ejecutan de acuerdo al

diagrama de flujo mostrado en la figura 3.3, en el cual se puede notar que en la parte inicial de la simulación se configuran y determinan las variables necesarias para la generación del escenario de análisis, se incluyen de manera aleatoria los UE siguiendo una distribución uniforme, además se identifican aquellos UE que se asocian a la estación base de análisis, teniendo en cuenta la distancia de estos a la MBS, para el correspondiente Control de Potencia (PC).

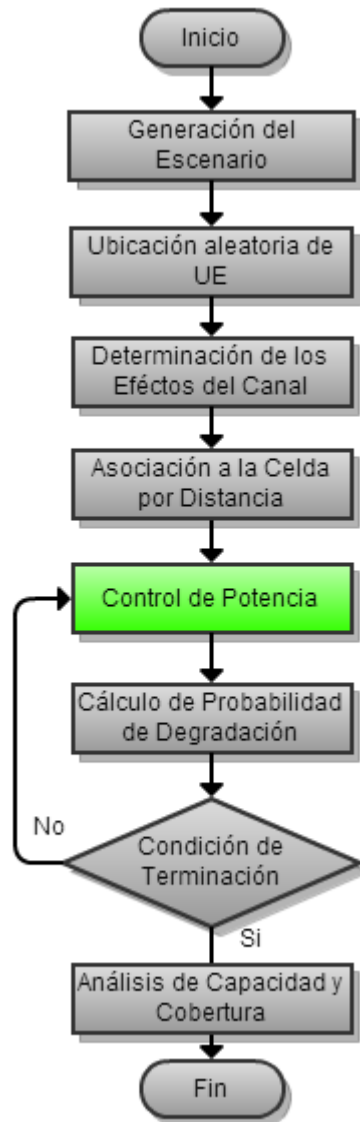


Figura 3.3 Diagrama de Flujo General del Sistema

Aquellos UE que quedan fuera de la celda de estudio, se les asigna una potencia de transmisión que se mantiene a lo largo de la simulación y la señal resultante en la MBS, después de verse afectada por las condiciones del canal, se considera como interferencia intercelda.

Durante la experimentación la capacidad del sistema y la probabilidad de degradación (*outage probability*) se determinan teniendo en cuenta la cantidad de usuarios atendidos con relación al total de usuarios que se encuentran asociados a la celda de análisis. Para el análisis de cobertura se considera el alcance máximo hasta superar el 5% de usuarios no atendidos del total de usuarios al interior de la celda.

La condición de finalización para el modelo de Control de Potencia (PC) depende de las iteraciones o repeticiones del juego, las cuales han sido establecidas en 1000, teniendo en cuenta que en la mayoría de las simulaciones realizadas, alrededor de las 1000 iteraciones el comportamiento del sistema converge, en otras palabras, las acciones toman un valor constante de probabilidad para una situación específica.

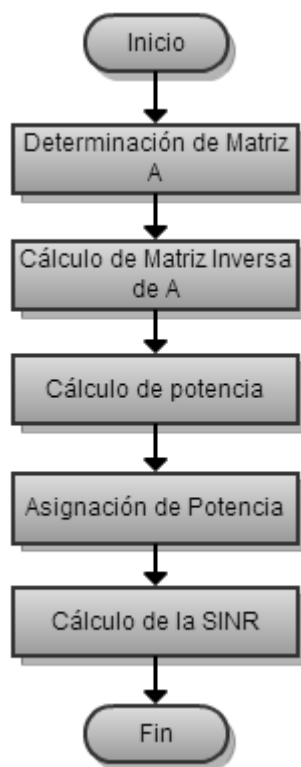


Figura 3.4 Diagrama de Flujo del Control Ideal de Potencia

El procedimiento de Control de Potencia (PC) especificado en el diagrama de flujo que muestra la figura 3.3, se realizó teniendo en cuenta el diagrama de flujo del Control Ideal de Potencia (IPC) y el diagrama de flujo del Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT), mostrados en las figuras 3.4 y 3.5 respectivamente. Al finalizar se comparan los resultados.

Es de resaltar que en el Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT) las condiciones iniciales de probabilidad toman valores arbitrarios, definidos al inicio de la simulación tal que la sumatoria de dichos valores sea igual a uno, utilizados

para configurar un valor de potencia inicial sobre el cual se realiza el análisis de Control de Potencia (PC) de transmisión.

Por otro lado, se debe mencionar que el procedimiento establecido por el diagrama de flujo de la figura 3.5, se repite para cada uno de los UE asociados a la MBS de análisis, los cuales se han identificado al inicio de la simulación como lo muestra el diagrama de flujo general del sistema.

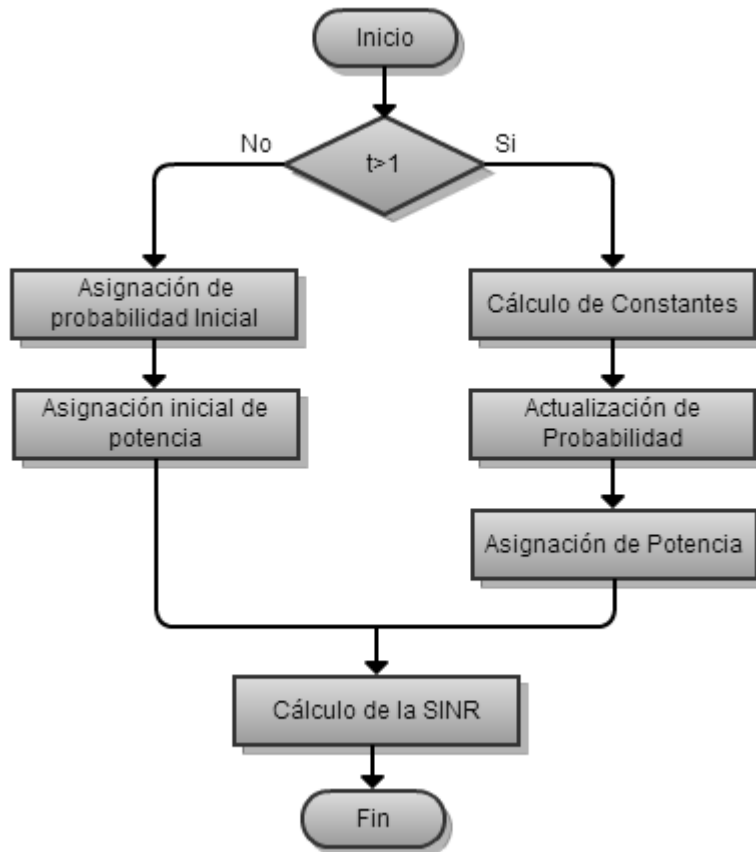


Figura 3.5 Diagrama de Flujo del Control de Potencia basado en Teoría de Juegos

3.4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Para la selección del lenguaje de programación se analizaron dos herramientas de simulación: Scilab 5.1 y Matlab® 7.10 (R2010a), las cuales satisfacen los requisitos de programación. Las pruebas iniciales no arrojaron diferencias significativas en el procesamiento matemático requerido, siendo factible la utilización de cualquiera.

La ventaja de Scilab frente a Matlab® es su libre distribución, bajo Licencia Publica General (GPL, *General Public License*), sin embargo, a nivel internacional Matlab® tiene mayor acogida en la comunidad científica e investigativa y dado que la

Universidad del Cauca cuenta con licencias, este se eligió como herramienta central de programación.

3.5 CODIFICACIÓN DEL MODELO

La codificación sobre Matlab® se lleva a cabo utilizando estructuras, definiendo dos estructuras básicas que interactúan para la implementación de los algoritmos definidos.

La primera estructura se denomina *BaseStation* donde se definen parámetros como: la identificación de la MBS, su posición en el escenario y la potencia de recepción que experimenta la MBS para la comunicación de cada UE.

La segunda estructura se denomina *Usuario* y contiene la información correspondiente a: ubicación del UE en el escenario, tipo de servicio al cual desea acceder, SINR obtenida en un determinado instante, distancia hasta la MBS, efectos del canal de comunicaciones sobre la señal de cada UE, potencia de transmisión y asociación de cada UE a la MBS.

Para la generación del escenario de simulación se utiliza una instancia de la estructura *BaseStation* y múltiples instancias de la estructura *Usuario*.

3.6 EXPERIMENTACIÓN

En la experimentación se tiene en cuenta la variación de las características del sistema, tales como: cantidad de usuarios, el tamaño de la celda, requerimientos de los UE, entre otros, para analizar los resultados obtenidos con la aplicación de los procedimientos de Control de Potencia (PC) definidos. En el capítulo 4 se presenta una descripción detallada de las pruebas realizadas.

3.7 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo se implementa el Control Ideal de Potencia (IPC) en el mismo escenario, el cual sirve como punto de referencia sobre el comportamiento adecuado del modelo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT) definido.

3.8 MONITOREO Y CONTROL

La codificación del algoritmo se desarrolla dejando abierta la posibilidad de variación o inclusión de nuevas características al sistema, que permita realizar otro tipo de análisis sobre las características importantes de un sistema de comunicaciones móviles e inalámbrico, además, la utilización de estructuras proporciona flexibilidad a la simulación dado que permite la inclusión y fácil manipulación de parámetros sobre dicho sistema.

CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas a la implementación del modelo basado en Teoría de Juegos (GT) y los resultados obtenidos. Inicialmente se presentan las pruebas realizadas y los resultados sobre un escenario de dimensiones 4 Km x 4Km, con una celda de radio igual a 1 Km, y SINR requerida de -20 dB⁸. Posteriormente, se cambia la SINR requerida a -14 dB y se analiza el impacto que tiene sobre el sistema el incremento de los requerimientos. En la siguiente prueba se introducen en el escenario usuarios con requerimiento de SINR de - 20 dB y - 14 dB; y se analiza la capacidad y cobertura obtenida.

En las pruebas posteriores se reduce el tamaño de la celda a 500 m para analizar el impacto que tiene sobre la capacidad y cobertura el cambio del tamaño de la celda y los requerimientos de SINR. Los cambios en los parámetros del escenario se realizan durante la configuración del mismo.

4.1 CELDA DE RADIO IGUAL A 1 KM

4.1.1 Primer Caso

En esta primera prueba se utiliza el escenario que muestra la figura 4.1, donde se identifica de color verde los UE que tienen satisfecho su requerimiento de SINR y de color rojo aquellos a los que no fue posible garantizar la SINR requerida. Los UE de color negro se encuentran asociados a otra MBS y están transmitiendo con una potencia constante de 20 dBm, lo cual permite un análisis del sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas en condiciones desfavorables. La potencia de transmisión de los UE asociados a otras MBS, generan sobre la MBS de análisis un nivel de interferencia constante.

⁸ En sistemas limitados por interferencia de única portadora, los valores de SINR son menores que cero, dado los otros usuarios que tienen comunicaciones activas generan interferencia a la señal de usuario bajo análisis.

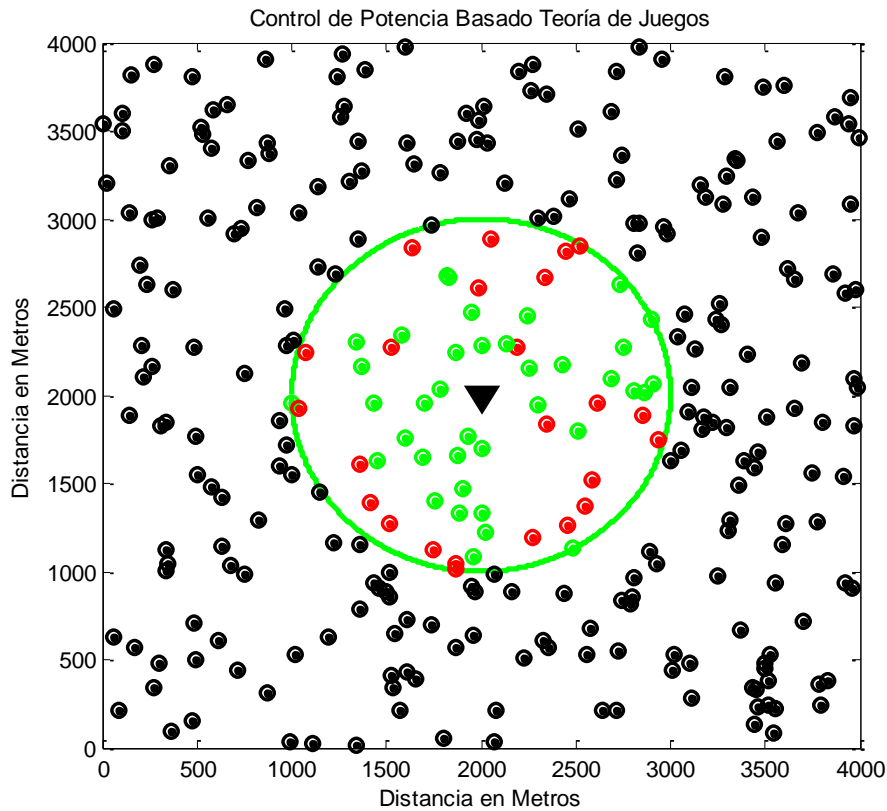


Figura 4.1 Escenario de Simulación con Celda de Radio 1 Km

Como se mencionó en la sección 3.1 la cantidad de UEs en el escenario es 300, ubicados de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme, además el sistema es limitado por interferencia con única portadora.

La prueba consistió en aplicar a este escenario el Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT) y repetir el procedimiento durante 1000 iteraciones. El resultado se presenta en la figura 4.2, donde al interior de la celda se encuentran 60 UE de los cuales se atendieron satisfactoriamente 38, lo cual corresponde a un 63% del total de UE al interior de la celda de estudio. El radio de cobertura alcanzado cumpliendo que la máxima probabilidad de degradación es del 5%, es de 461 m, determinado teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra el tercer usuario al cual no se le garantiza el nivel de SINR requerido.

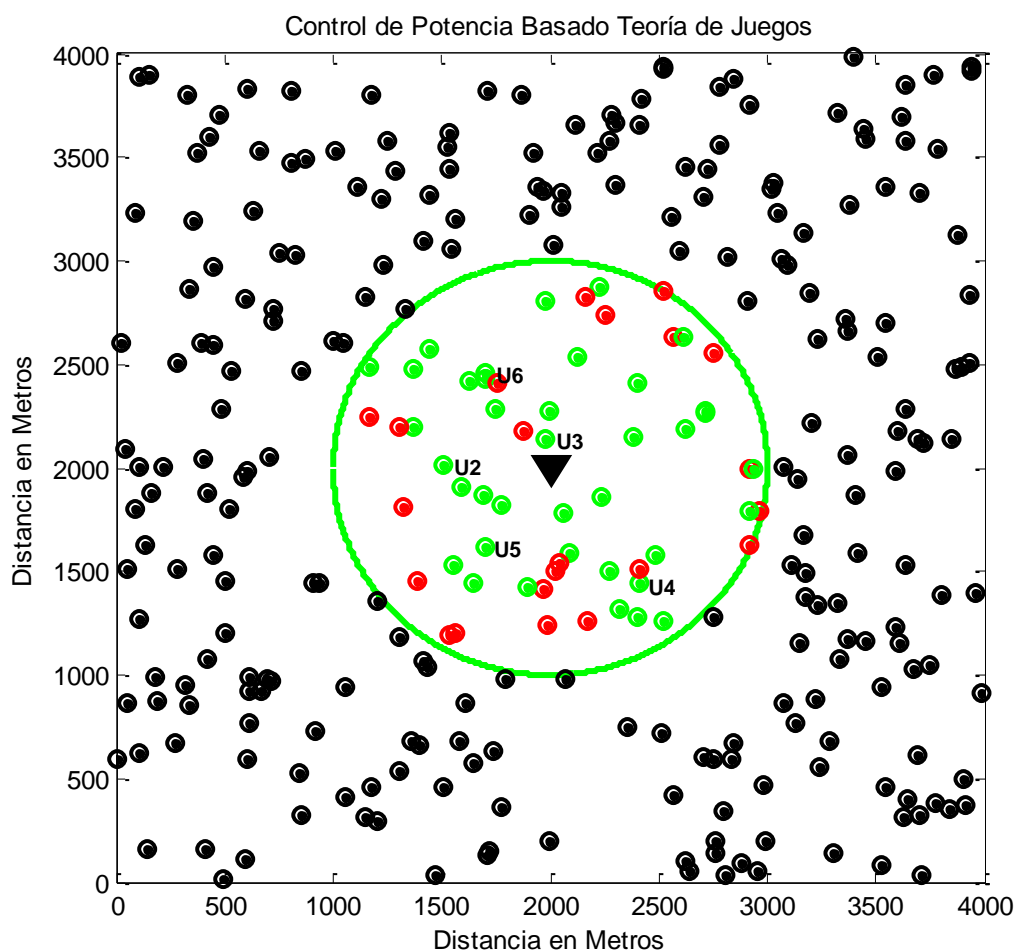


Figura 4.2 Resultado del Primer Caso para la Celda de Radio 1 Km

La figura 4.3 muestra la variación de las probabilidades de las potencias de transmisión de un usuario ubicado aproximadamente a 493 m de la MBS, en la cual se puede notar como varía considerablemente la probabilidad de las potencias de transmisión de 5 dBm a 8 dBm, causando que el UE en la iteración 154 cambie hacia una potencia de transmisión mayor debido al incremento de la interferencia presente en el sistema.

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran la variación de las probabilidades de dos usuarios ubicados a 687 m y 142.6 m de la MBS, en la cual se puede notar que el UE que se encuentra más lejos requiere una potencia de transmisión de 23 dBm, mayor a la que utiliza el UE ubicado a 142.6 m la cual es -1 dBm.

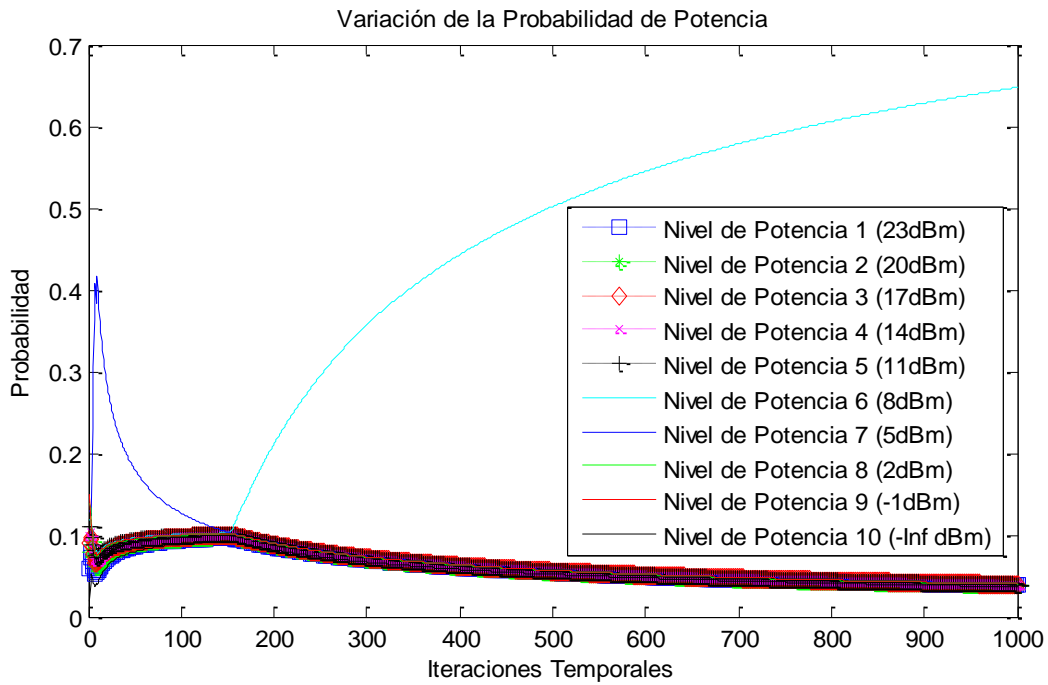


Figura 4.3 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 493 m

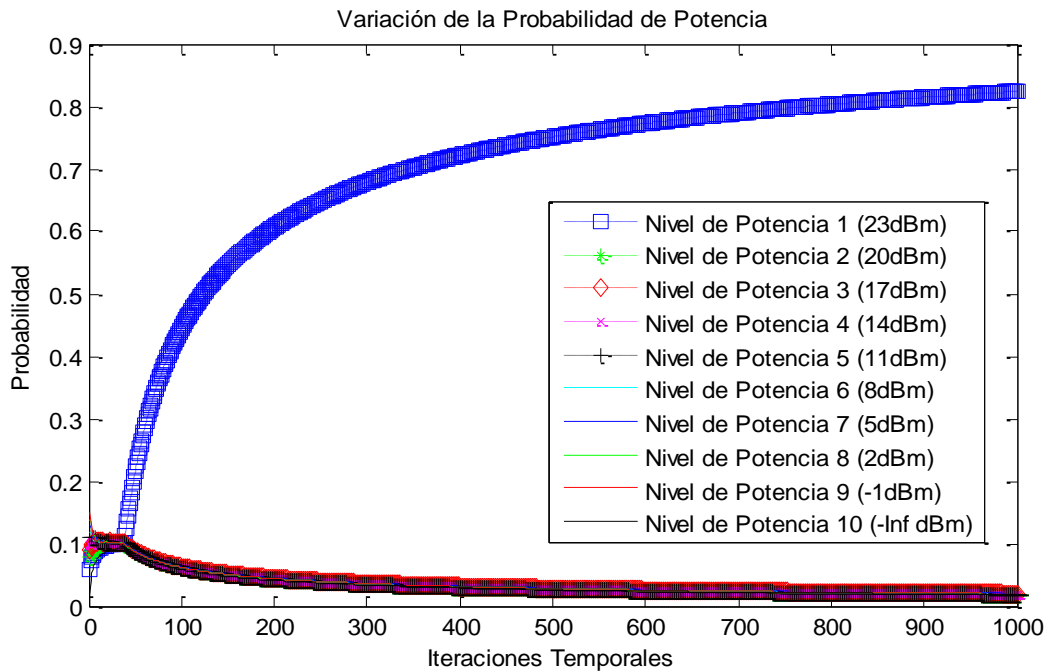


Figura 4.4 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 687 m

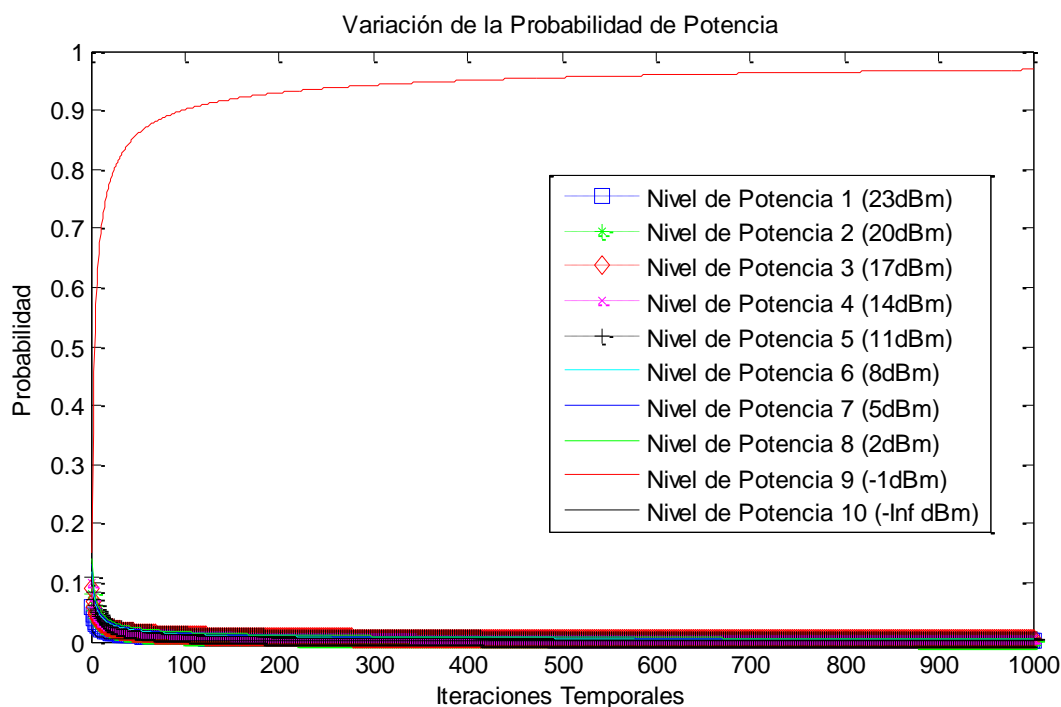


Figura 4.5 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 142.6 m

En las figuras 4.4 y 4.5, se puede notar el incremento de la probabilidad de la potencia de transmisión requerida con la evolución temporal, mientras que la probabilidad de las demás potencias de transmisión disminuye proporcionalmente.

En la figura 4.4 se muestra como en las primeras iteraciones del algoritmo, el UE determina la potencia de transmisión más adecuada, debido a la variación de la probabilidad de cada una de las potencias de transmisión discretas, definidas para los UE. Esto se hace evidente en la figura 4.6, donde se realizó un acercamiento sobre la figura 4.4, en la cual se ve como la probabilidad se va alternando entre las opciones posibles hasta que identifica la potencia de transmisión que mejor se adecua a las condiciones del sistema, en este caso 23 dBm, y a partir de este punto incrementa el valor de probabilidad correspondiente a la potencia seleccionada.

La figura 4.7 muestra la variación de la SINR a lo largo de la simulación, se puede notar como en las primeras iteraciones existe una gran fluctuación debido al estudio inicial de las condiciones del sistema, sin embargo, cuando los usuarios empiezan a seleccionar su potencia de transmisión, la SINR se estabiliza.

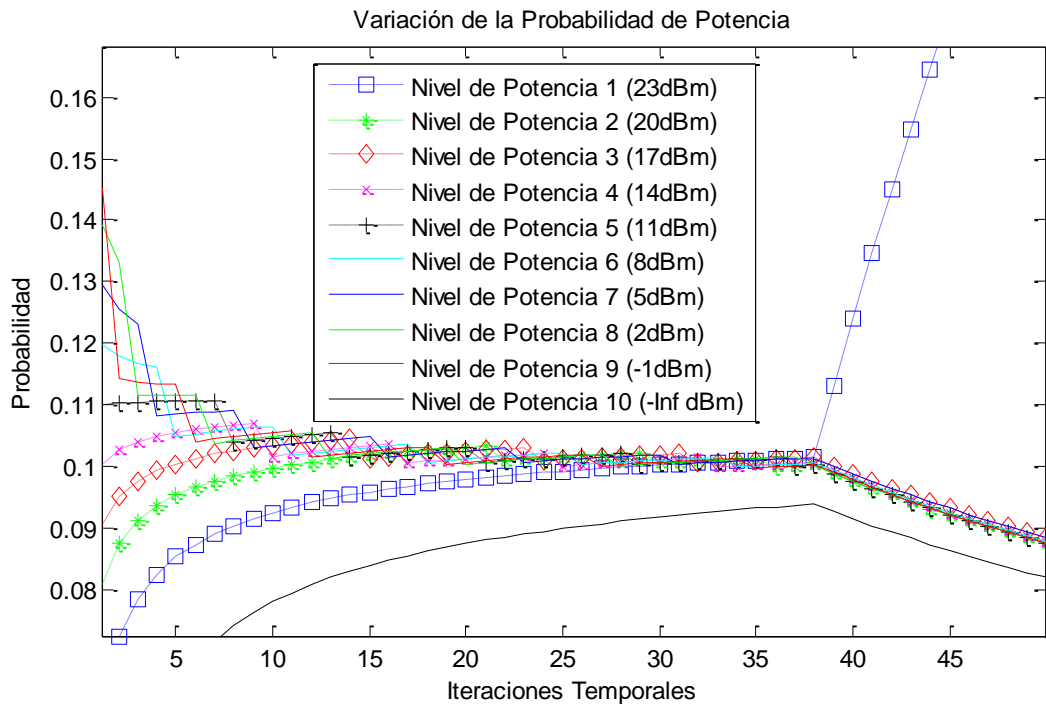


Figura 4.6 Variación de Probabilidades Primeras Iteraciones

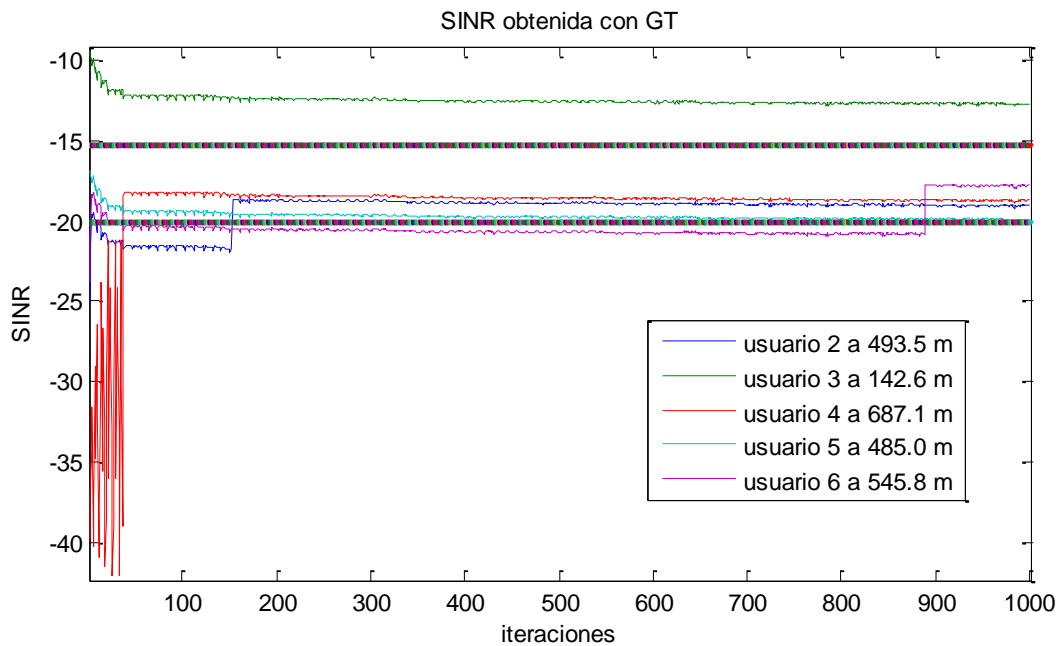


Figura 4.7 Variación de la SINR para el Primer Caso con Celda de Radio 1 Km

Se observa en la figura 4.7 que la SINR de los usuarios 2, 4 y 5 se mantiene dentro de un rango permitido (-20 dB a -15 dB), debido a la aplicación del algoritmo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT), sin embargo debido a las condiciones del canal y al reducido número de potencias disponibles para los UE,

los usuarios próximos a la MBS pueden causar interferencia considerable dado que la SINR supera los valores establecidos, como se puede observar en la variación de la SINR para el usuario 3 que se muestra en la figura 4.7, la cual corresponde al UE ubicado a 142.6 m de la MBS cuya potencia de transmisión es la mínima permitida, -1 dBm o 0.79 mW.

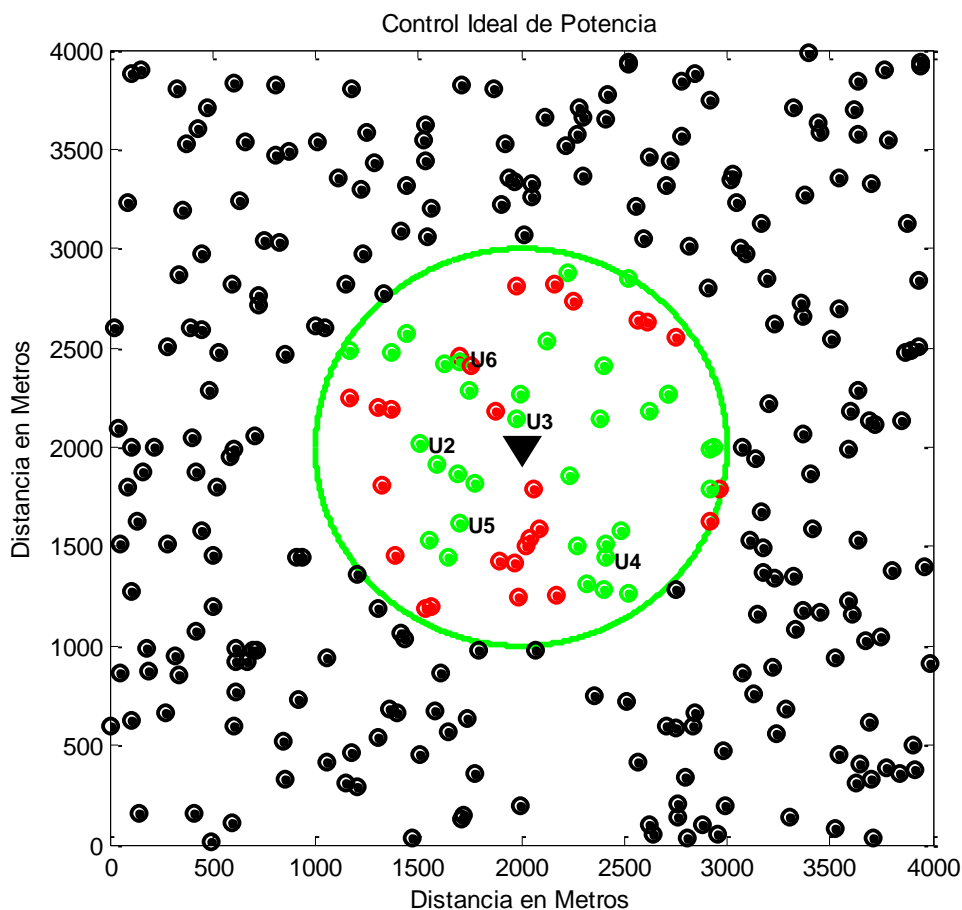


Figura 4.8 Primer Caso con Control Ideal de Potencia

El resultado de aplicar Control Ideal de Potencia (IPC) sobre el escenario del primer caso, se muestra en la figura 4.8, donde el sistema atendió a 34 UE de los 60 UE que se encuentran al interior de la celda de estudio, obteniendo una capacidad aproximada a la conseguida con la aplicación del Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT). El radio de cobertura se reduce a 420 m, teniendo en cuenta el 5% de probabilidad de degradación.

Se debe aclarar que en algunas simulaciones la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC) permitió atender más usuarios que con la aplicación de la Teoría de Juegos (GT), sin embargo, los resultados presentados corresponden a los que ocurrieron con mayor frecuencia. Además, para la aplicación del Control Ideal de

Potencia (IPC) la ubicación de los usuarios no se altera, por lo cual el valor de la probabilidad de degradación se mantiene constante.

La figura 4.9, muestra como evoluciona la probabilidad de degradación en el sistema, cuando sobre este se aplica en primer lugar la Teoría de Juegos (GT) y seguido el Control Ideal de Potencia (IPC). Se puede notar que el sistema evoluciona con la aplicación del algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) reduciendo progresivamente la probabilidad de degradación hasta niveles más bajos que los obtenidos con la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC).

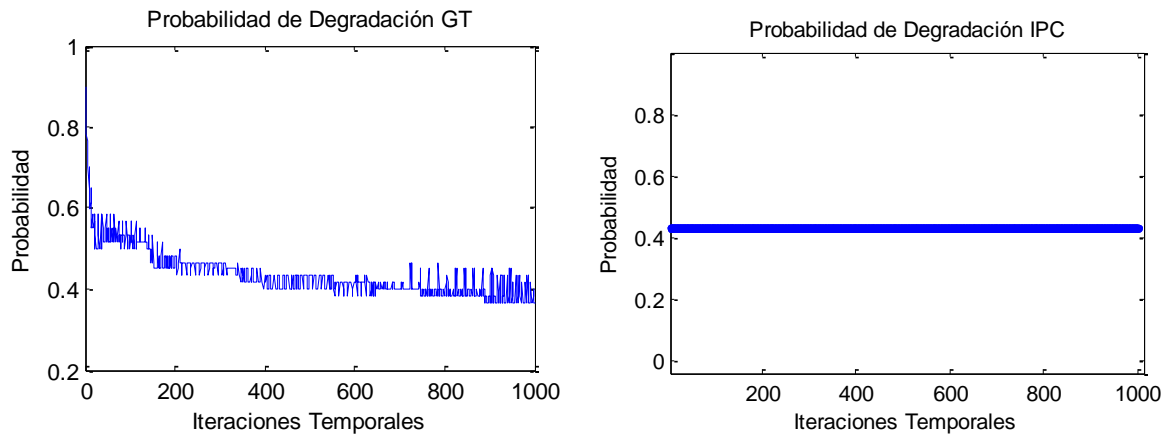


Figura 4.9 Probabilidad de Degradación Primer Caso para GT e IPC

Para el modelo basado Teoría de Juegos (GT) la potencia promedio alcanzada por los UE con su requerimiento de SINR satisfecho es de 26.32 mW o 17.51 dBm y para el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) se tiene una potencia promedio de 52.4 mW o 17.19 dBm, alcanzando en los dos casos potencia promedio similares.

4.1.2 Segundo Caso

Los usuarios presentes en el escenario tienen un requerimiento de servicio superior, teniendo como umbral de SINR -14 dB, para lo cual se realizaron diferentes simulaciones con 1000 iteraciones del algoritmo.

La figura 4.10 muestra los resultados de la simulación, en este caso el sistema atiende 11 UE de un total de 66, lo cual constituye un 16.67% de los UE al interior de la celda, evidenciando el alto impacto que tiene el incremento de los requerimientos del servicio, haciendo al sistema menos tolerante a la interferencia y especialmente reduciendo el radio de cobertura hasta 333 m.

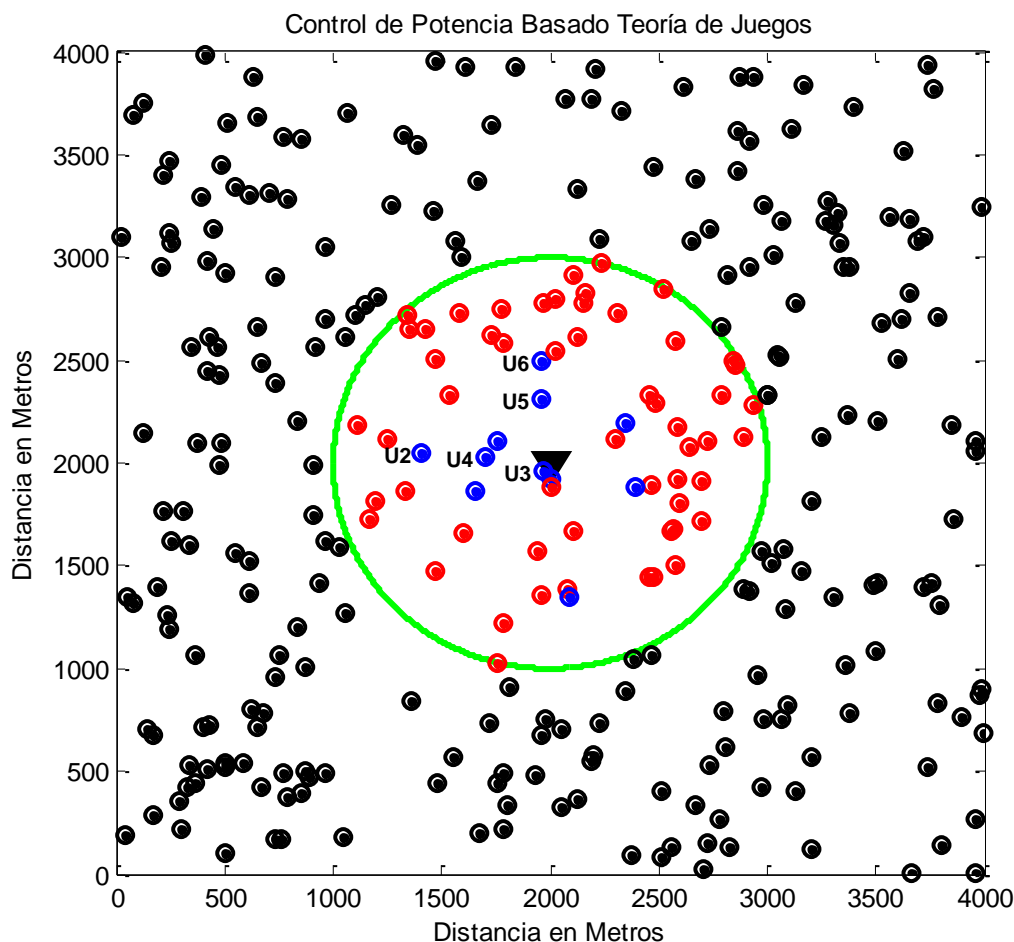


Figura 4.10 Resultado del Segundo Caso para la Celda de 1 Km

Se puede notar que el tamaño de la celda se reduce debido al incremento en el requerimiento de los UE, lo cual conlleva a un incremento en los requerimientos de los UE, generando el fenómeno conocido como respiración celular⁹ (*Cellular Breathing*), efecto típico en los sistemas limitados por interferencia.

Las figuras 4.11 y 4.12 muestran que al igual que en el primer caso, el algoritmo se toma un tiempo para identificar la potencia de transmisión adecuada para las condiciones del sistema, además, se puede notar en la figura 4.12 como el sistema en un inicio identifica como adecuada una potencia de 14 dBm, pero debido a los cambios en las condiciones del sistema y al nivel de interferencia, el UE que se encuentra a 317.4 m incrementa su potencia de transmisión a 17 dBm.

⁹ La respiración celular se presenta cuando los niveles elevados de interferencia obligan a los UE a aumentar su potencia de transmisión y aquellos que estén más distantes, debido a limitaciones de sus respectivas categorías, no podrán incrementar sus potencias y por lo tanto la calidad requerida de sus servicios se ve afectada, reduciendo la cobertura del sistema. En el caso contrario, cuando no existe un nivel considerable de interferencia la cobertura se amplía y funciona como un método automático de balanceo de carga en sistemas limitados por interferencia.

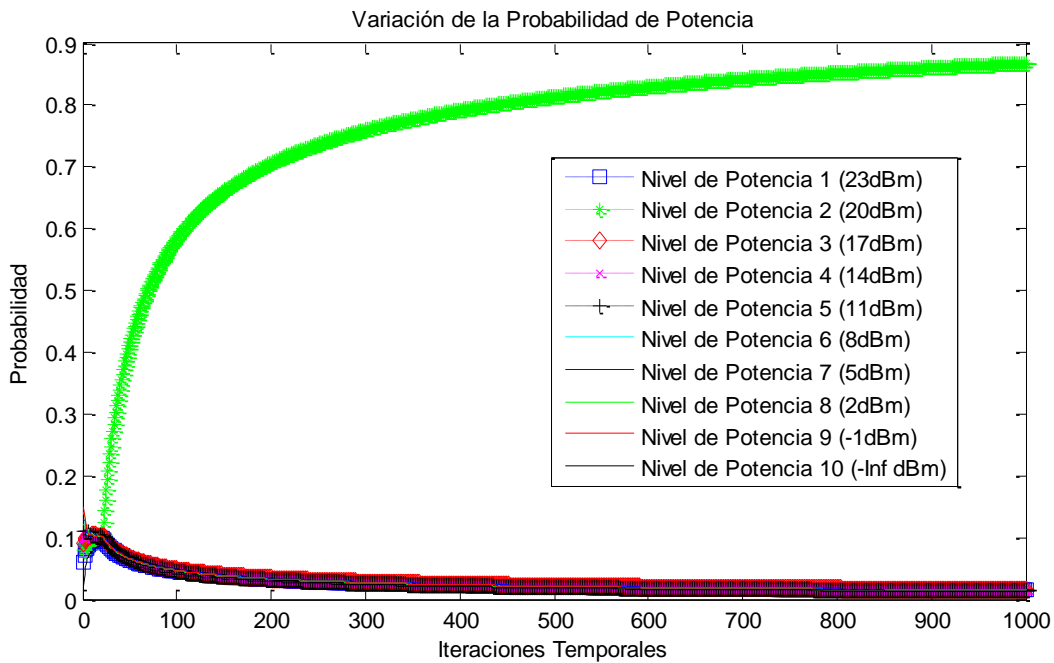


Figura 4.11 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 598.5 m

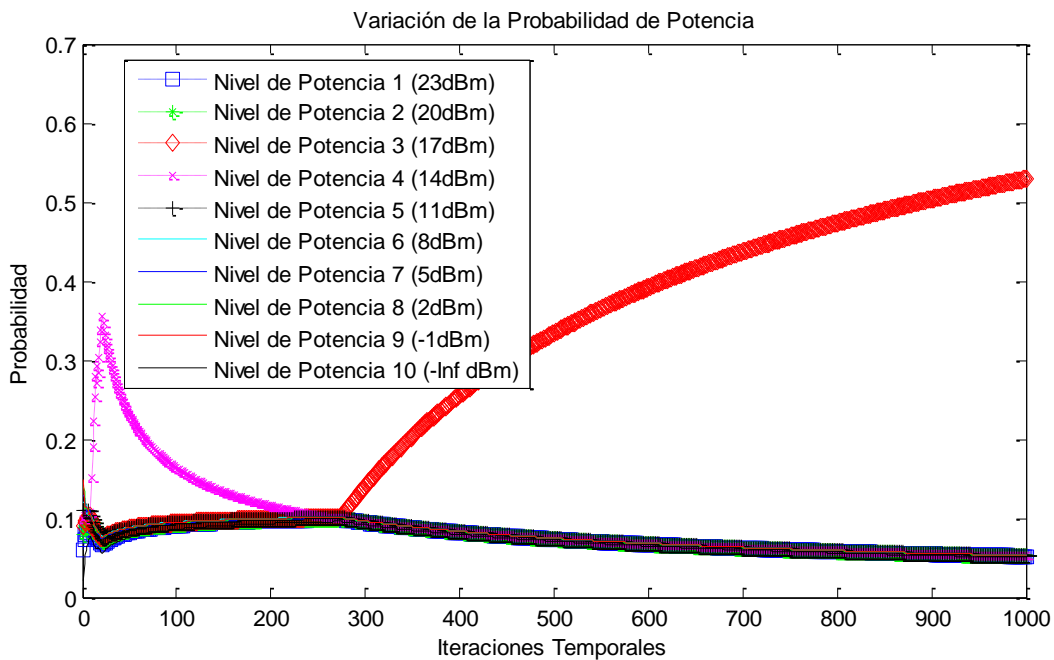


Figura 4.12 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 317.4 m

Es interesante ver como el algoritmo aprende y analiza el comportamiento del sistema, causando más de un cambio en la potencia de transmisión como lo muestra la figura 4.13, donde inicia con una potencia de transmisión de 11 dBm, pasa por una de 14 dBm y converge finalmente en una de 17 dBm.

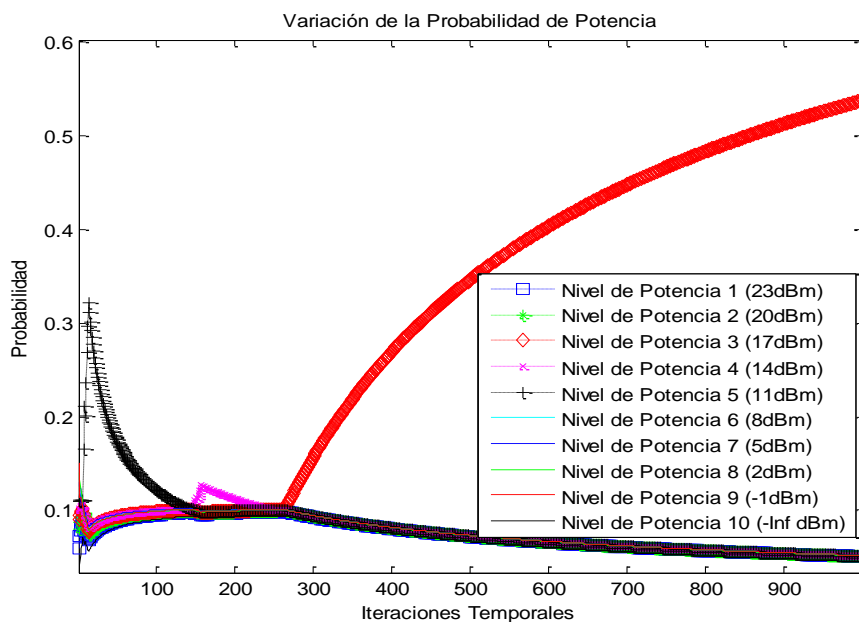


Figura 4.13 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 626.3 m

Los resultados de la variación de la SINR en el sistema se observan en la figura 4.14, en la cual se puede notar que el sistema experimenta grandes fluctuaciones, sin embargo, logra converger.

De igual manera, se puede ver como los UE cercanos a la MBS pueden generar fuerte interferencia no deseada al transmitir con una potencia superior a la adecuada, debido a los pocos niveles discretos de potencia permitidos para los UE (figura 4.14, usuario 3).

Con la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC) en el segundo caso, el sistema no pudo atender ningún usuario, como lo muestra la figura 4.15, esto se debe a que en la solución del sistema lineal de ecuaciones, las potencias resultantes son valores reales exactos y las potencias establecidas para los UE, pertenecen a un conjunto discreto de valores, por lo tanto al asociar las potencias obtenidas con el Control Ideal de Potencia (IPC) con las potencias de transmisión discretas permitidas para los UE, el Control Ideal de Potencia (IPC) queda limitado y los niveles de interferencia presentes en el sistema son elevados. Para este caso el radio de cobertura es igual a cero metros.

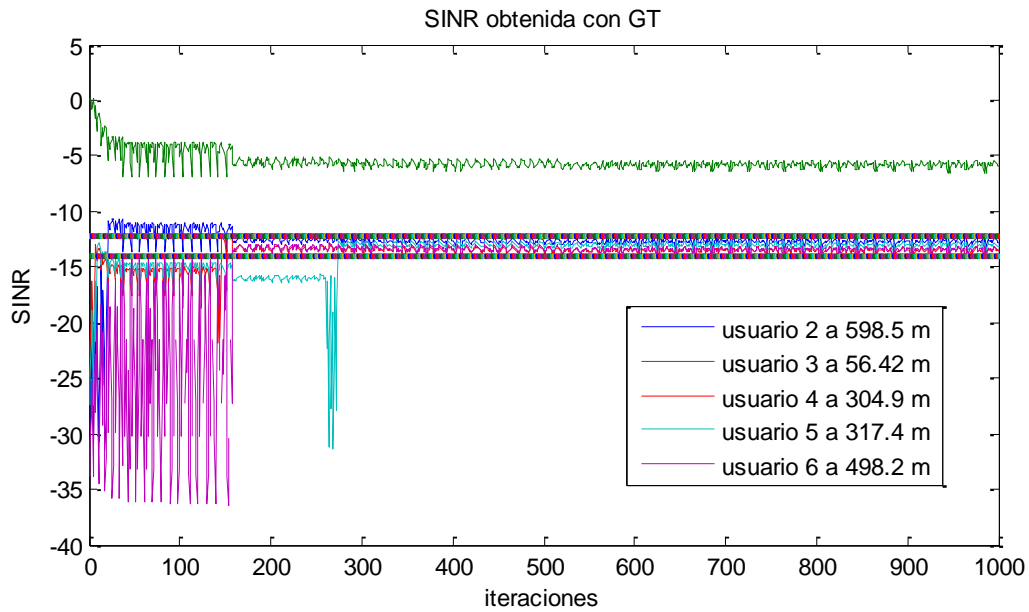


Figura 4.14 Variación de la SINR para el Segundo Caso con Celda de Radio 1 Km

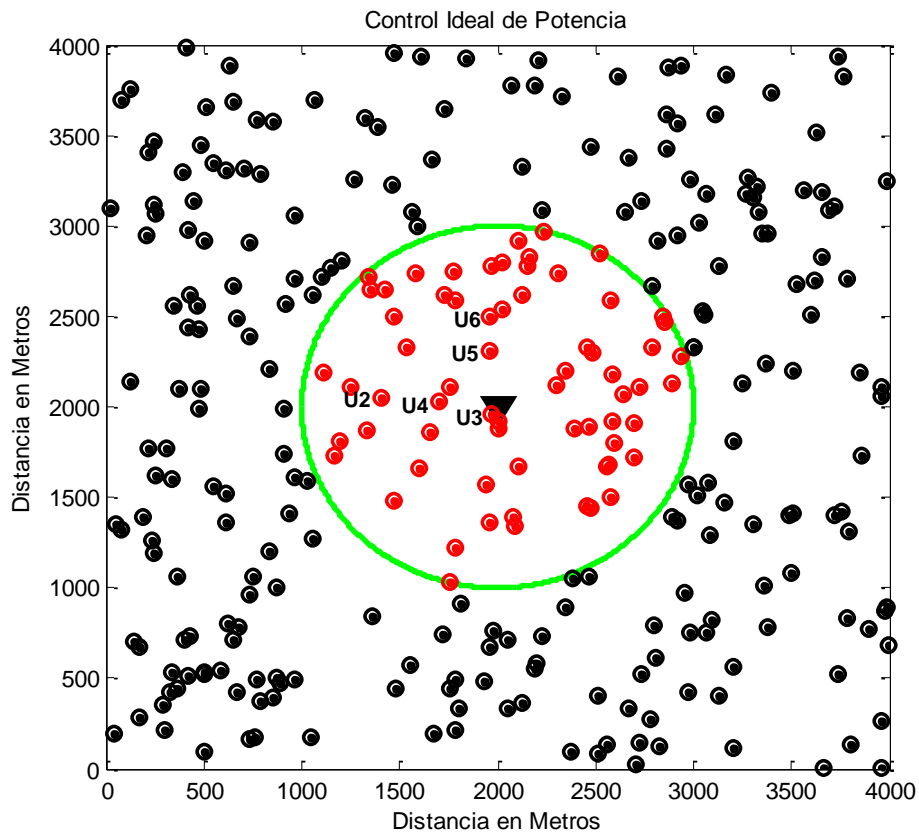


Figura 4.15 Resultado del Segundo Caso con Control Ideal de Potencia

Como es de esperar la probabilidad de degradación para el sistema que implementa el algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) es inferior a la probabilidad alcanzada

aplicando Control Ideal de Potencia (IPC), lo cual se puede ver en la figura 4.16, donde el algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) reduce la probabilidad de degradación, mientras que el Control Ideal de Potencia (IPC) no puede garantizar el acceso a los UE presentes en la celda al sistema.

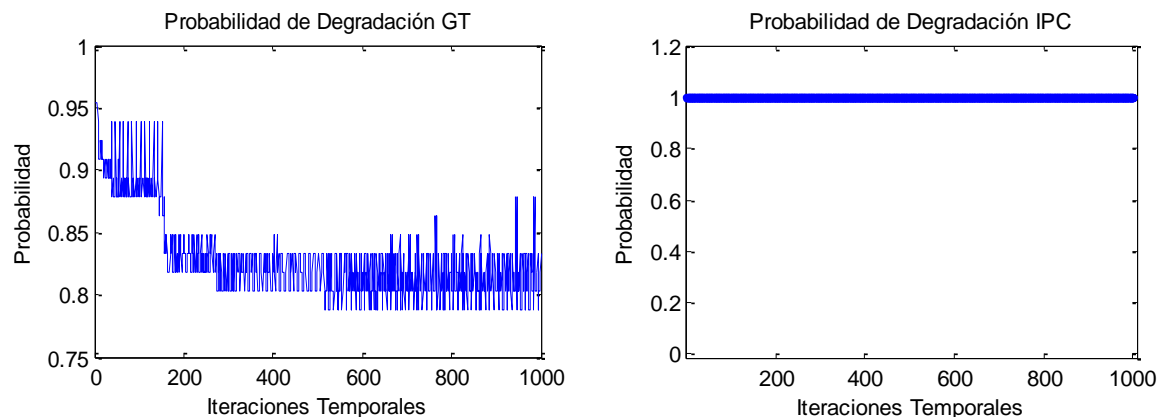


Figura 4.16 Probabilidad de Degradación Segundo Caso para GT e IPC

Comparando este resultado con el primer caso, se puede notar que cuanto mayor sea el SINR requerido por parte de los UE, mayor será la probabilidad de degradación, y de igual manera el sistema experimenta mayores variaciones en los niveles de SINR.

La potencia de transmisión promedio para el modelo basado en Teoría de Juegos (GT) para este caso es de 97.51 mW o 19.89 dBm que no excede la máxima potencia utilizable, para el modelo de Control Ideal de Potencia no se obtiene un valor dado que no se satisface los requerimientos de SINR para ningún usuario.

4.1.3 Tercer Caso

Para este caso, se combina en el escenario UE con requerimientos de SINR de -14 dB y -20 dB. Las pruebas se realizaron con 1000 iteraciones del algoritmo, obteniendo los resultados mostrados en la figura 4.17.

El sistema atiende 20 UE de un total de 57 UE, aproximadamente el 35.1%, de los cuales 8 requieren una SINR de -14 dB y 12 requieren una SINR de -20 dB. Comparando este resultado con el caso uno, se puede notar que la cantidad de UE atendidos se reduce, pero que dicha cantidad es superior a la capacidad alcanzada en el segundo caso, entonces si en un sistema para algunos UE no es factible garantizar la SINR objetivo, se tiene la posibilidad de ofertar el servicio con una calidad inferior, si este lo permite. El radio de cobertura se incrementa hasta 613 m, un valor superior al obtenido en los casos 1 y 2, esto se debe al efecto aleatorio del desvanecimiento que presenta el canal.

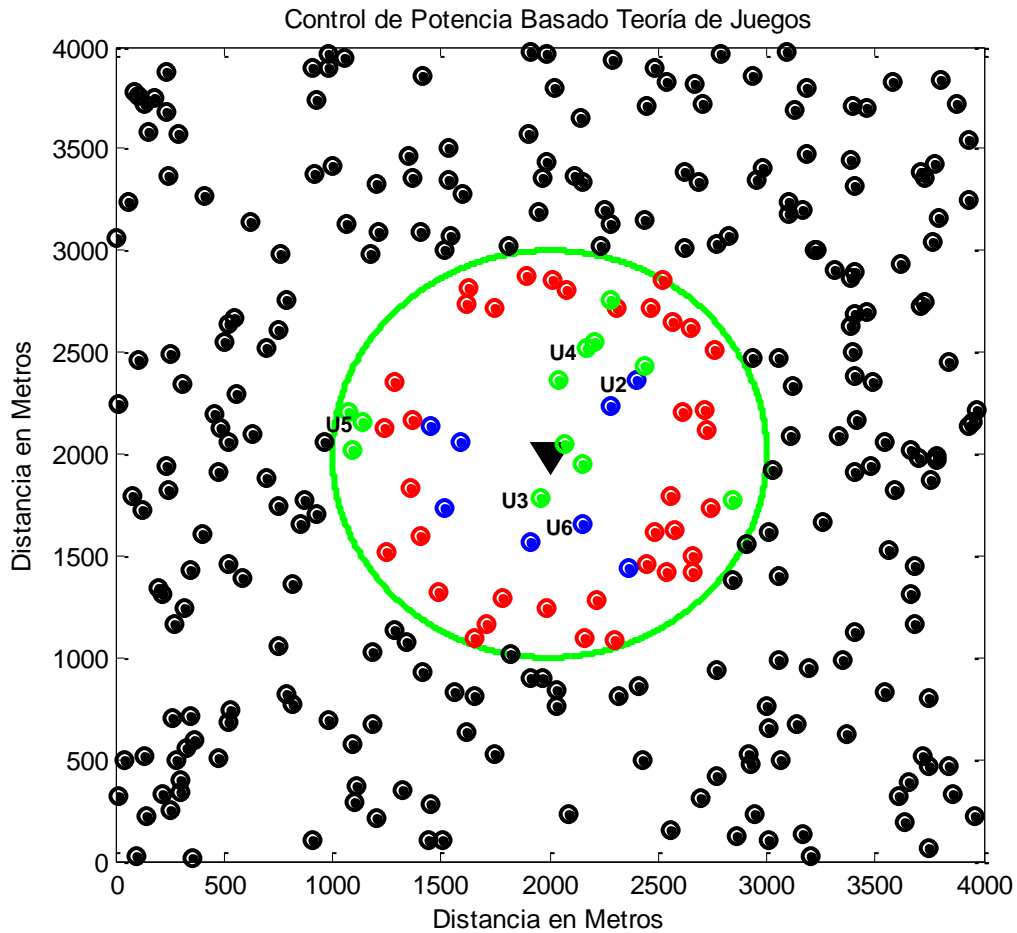


Figura 4.17 Resultado del Tercer Caso con Celda de 1 Km

En este escenario, la variación de probabilidad sigue el mismo comportamiento observado en los casos anteriores, cada UE experimenta un periodo de aprendizaje hasta determinar la potencia adecuada de transmisión. Se puede ver en las figuras 4.18 y 4.19 que los usuarios que se encuentran más distantes de la MBS requieren más iteraciones para determinar la potencia de transmisión adecuada.

De igual manera que en los casos anteriores, los UE que se encuentran cerca a la MBS generan considerable interferencia a los UE lejanos de la MBS, lo que se soluciona habilitando al UE para trabajar con potencias de transmisión más bajas.

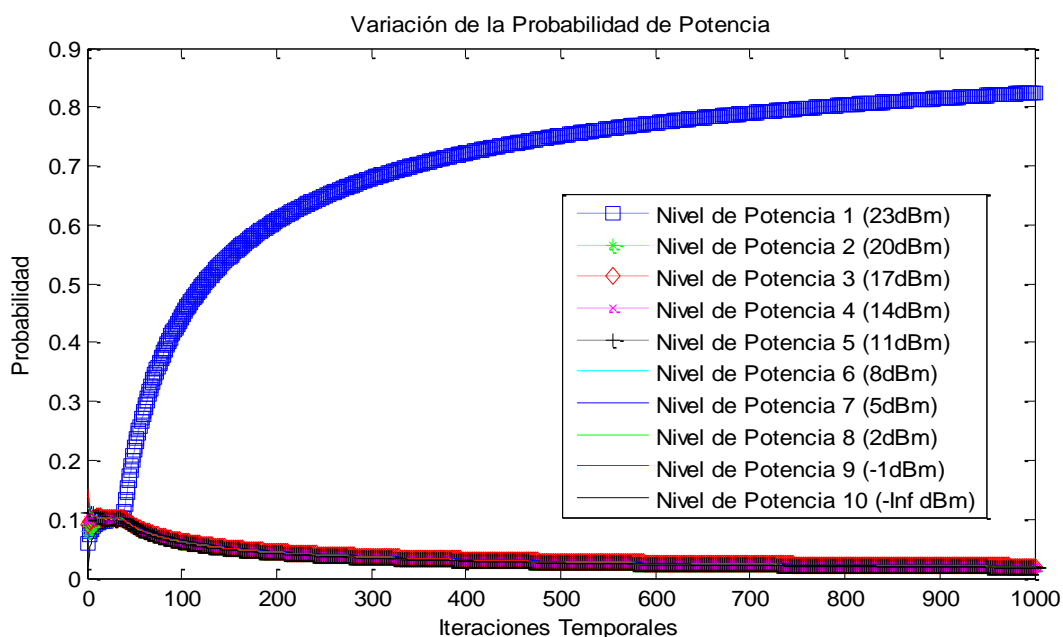


Figura 4.18 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 540.7 m

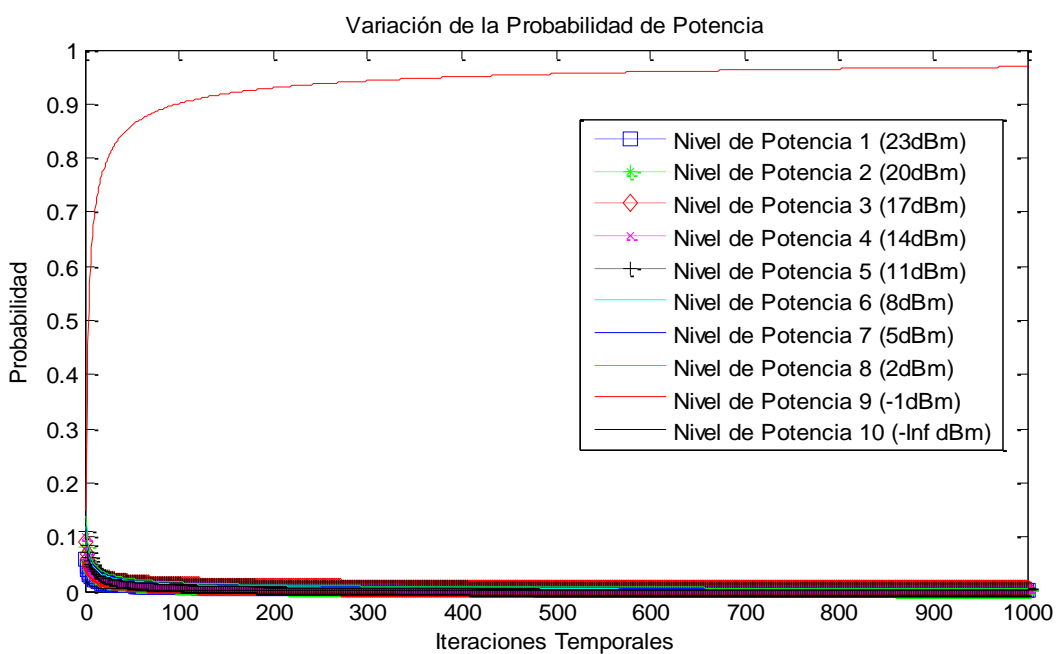


Figura 4.19 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 224.5 m

Se puede notar en la figura 4.20, como la aplicación del algoritmo adecua la potencia de transmisión de los UE, logrando que dichos UE utilicen la energía de manera eficiente, disminuyendo la interferencia causada sobre otros UE o sistemas de comunicaciones. Se observa claramente el periodo de aprendizaje, en el cual se establece la potencia adecuada para transmisión, sin embargo, se nota que al igual

que en los casos anteriores los UE cercanos a las MBS pueden generar niveles inadecuados de interferencia debido a que la mínima potencia establecida genera altos niveles de potencia recibida en la MBS.

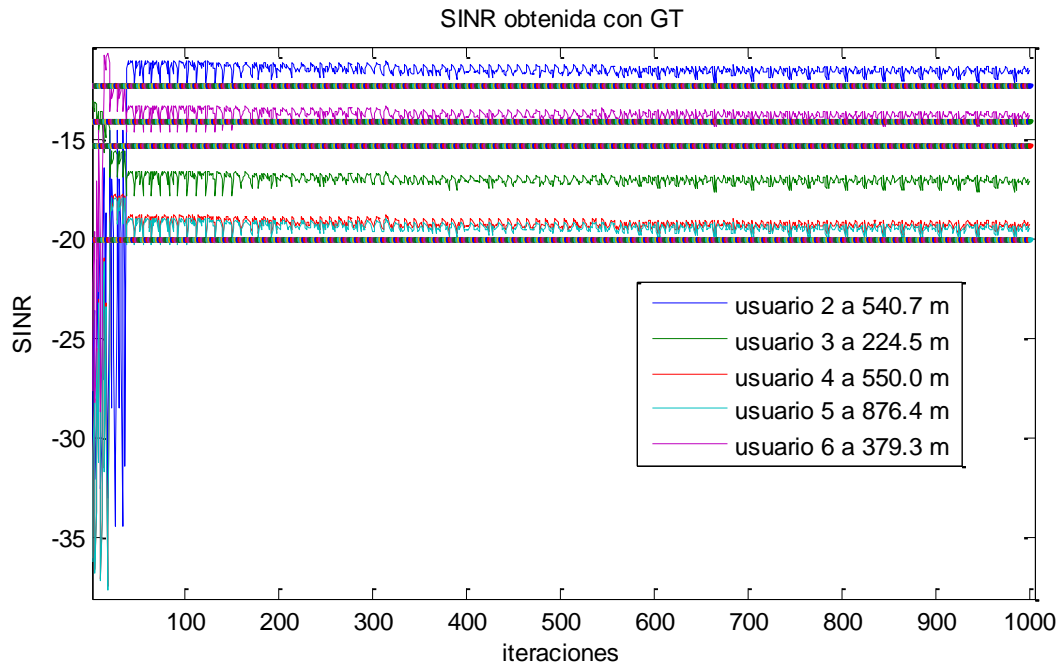


Figura 4.20 Variación de la SINR para el Tercer Caso con Celda de Radio 1 Km

El comportamiento del Control Ideal de Potencia (IPC) no fue adecuado, debido a los niveles discretos de potencia de transmisión definidos para el escenario de simulación. Al discretizar los resultados obtenidos con la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC), los niveles de potencia de transmisión de algunos UE se incrementan considerablemente causando un aumento en el nivel de interferencia y por ende el sistema no puede atender a ningún usuario, como se muestra en la figura 4.21.

Como se espera la probabilidad de degradación del escenario aplicando el Control Ideal de Potencia (IPC) alcanza el valor de uno, mientras que con la aplicación del algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT), la probabilidad de degradación disminuye procurando atender la mayor cantidad de usuarios posible, incluso el comportamiento del sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas tiene es más estable que en el segundo caso.

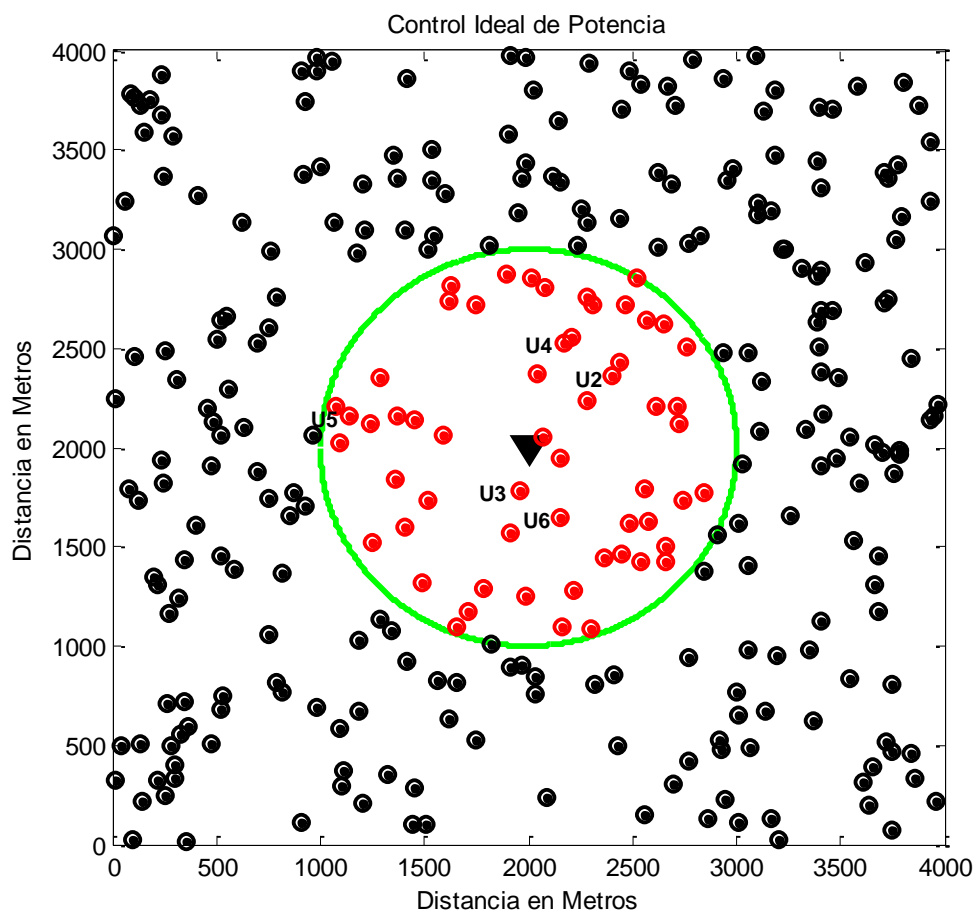


Figura 4.21 Resultado del Tercer Caso con Control Ideal de Potencia

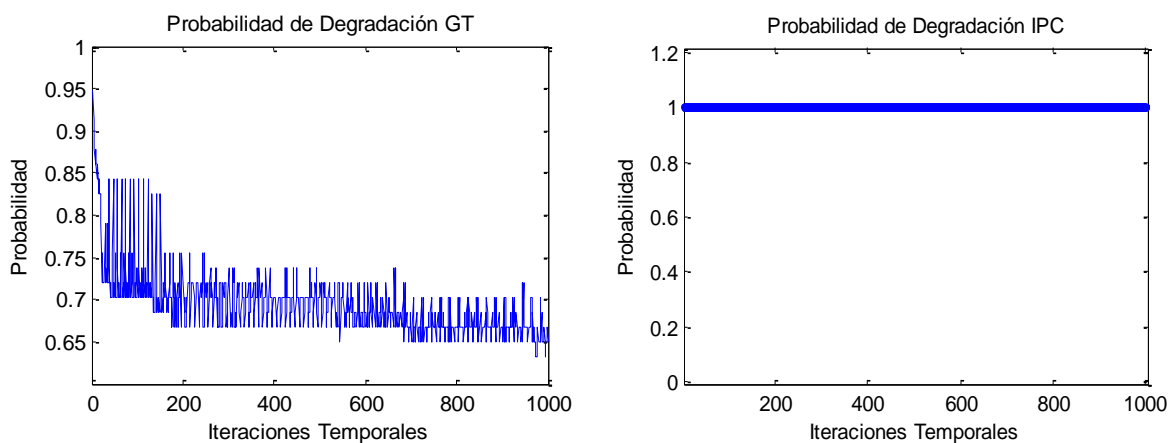


Figura 4.22 Probabilidad de Degradación Tercer Caso para GT e IPC

Para el tercer caso implementando el modelo basado en Teoría de Juegos (GT) se obtiene una potencia de transmisión promedio de 95.515 mW o 19.8 dBm un valor ligeramente inferior al obtenido en el segundo caso, mientras que para el modelo de

Control Ideal de Potencia (IPC) no es posible determinar la potencia promedio debido a que no se da cobertura a ningún UE.

4.2 CELDA DE RADIO 500 M

Para las siguientes pruebas se realizó una modificación sobre el escenario, reduciendo el radio de la celda a 500 metros, manteniendo el número de usuarios y las dimensiones del escenario de simulación.

4.2.1 Primer Caso

En el primer caso con el SINR requerido de -20 dBm, el sistema atiende 14 UE de un total de 15 UE, lo que corresponde al 93.3% de los UE presentes en la celda, se nota además, que la cobertura corresponde al radio definido para la celda.

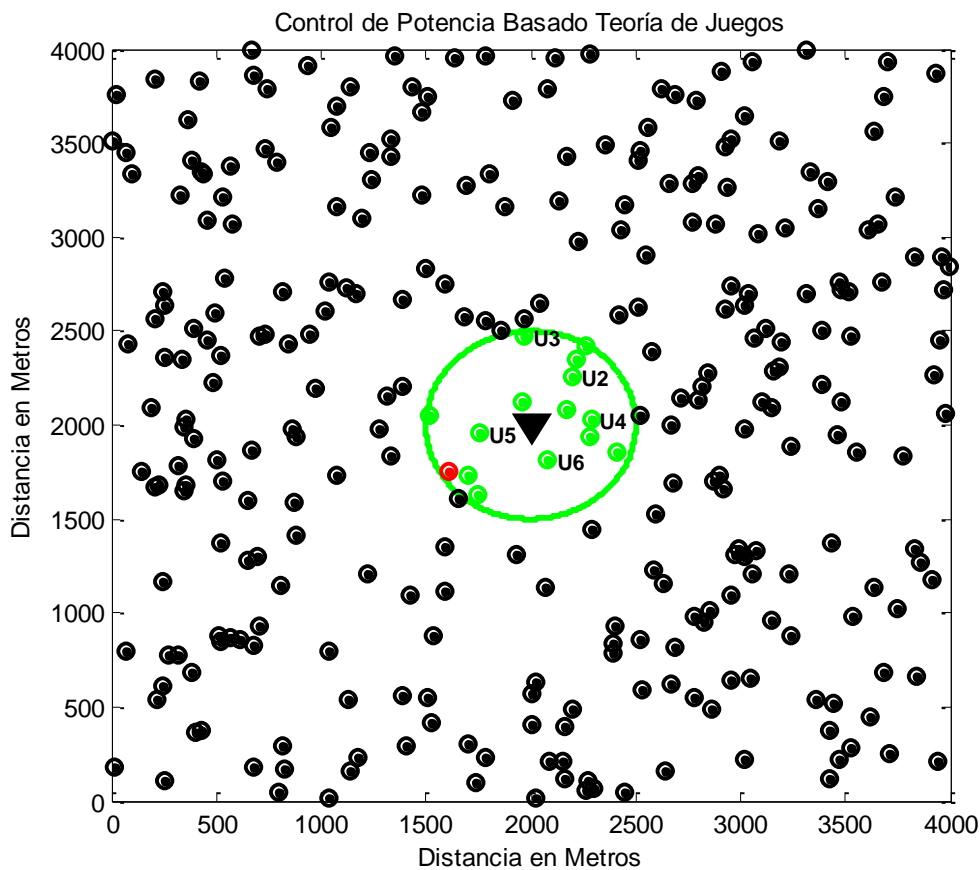


Figura 4.23 Resultado del Primer Caso con Celda de Radio 500 m

Con la reducción del tamaño de celda, el sistema tiene un mejor comportamiento y se facilita la determinación de potencias, lo cual se notar en la figura 4.24 donde el sistema toma menos tiempo de aprendizaje para determinar la potencia de transmisión, lo cual se hace evidente en la figura 4.25 que corresponde a un acercamiento sobre la figura 4.24.

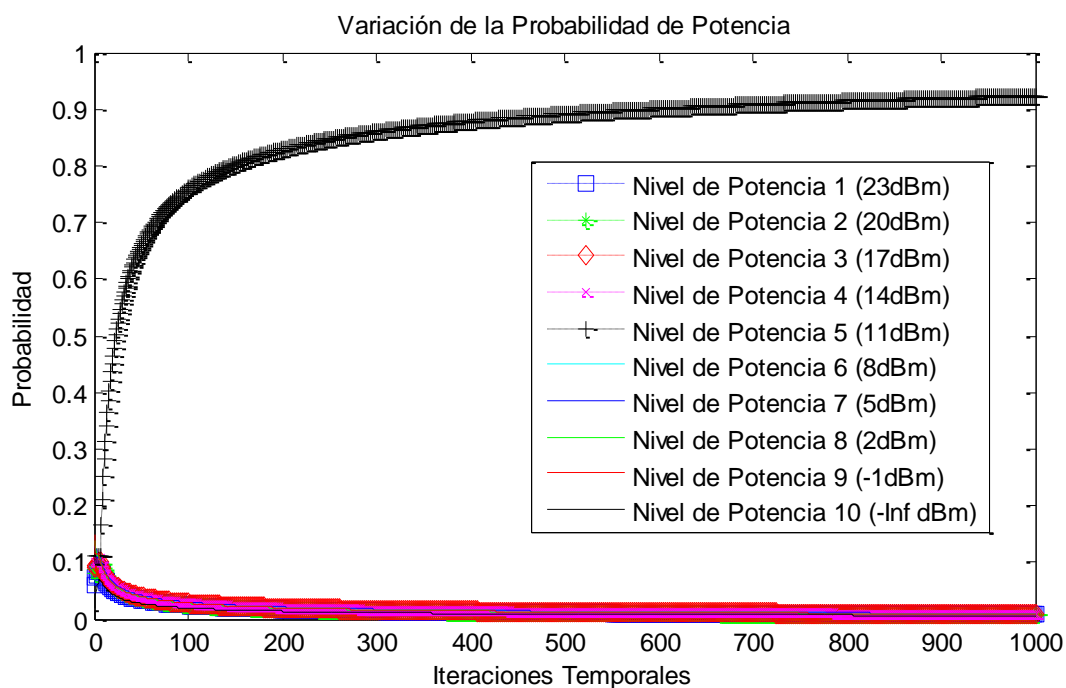


Figura 4.24 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 323 m

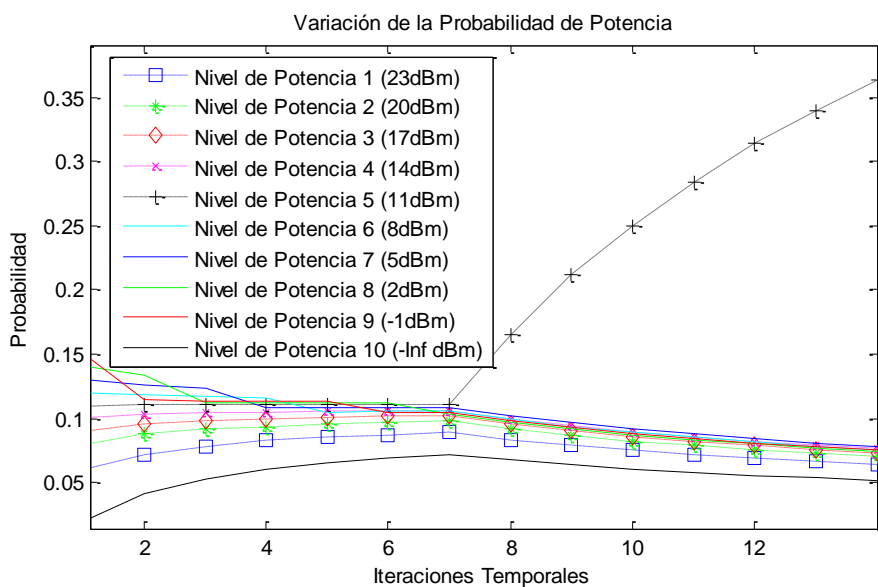


Figura 4.25 Acercamiento Sobre las Primeras Iteraciones del Algoritmo

Al reducir el tamaño de celda, los UE transmiten con potencias menores como lo muestra la figura 4.26, dado que se reducen las distancias entre los UE y la MBS, y esto causa que la interferencia al interior de la celda disminuya.

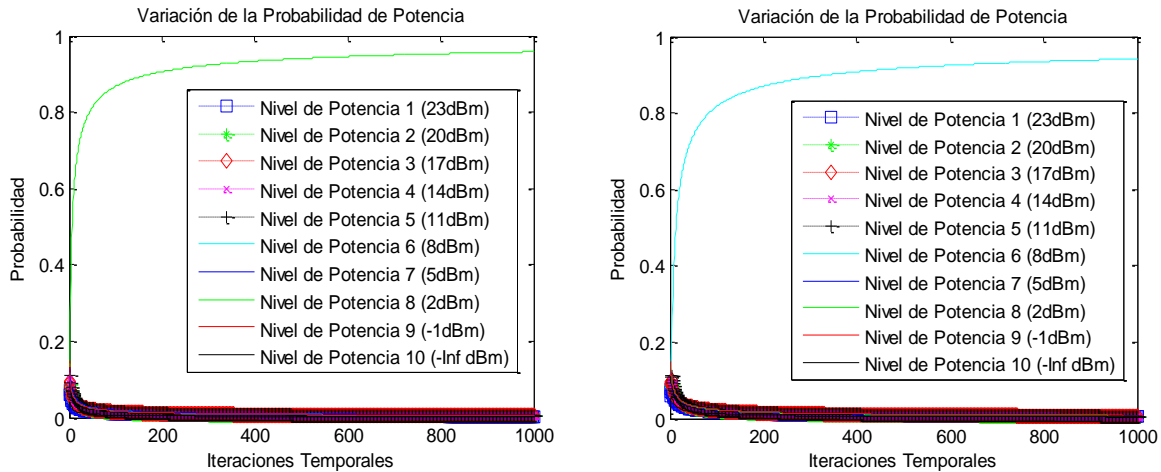


Figura 4.26 Variación de Probabilidad de Potencia UE al Interior de la MBS

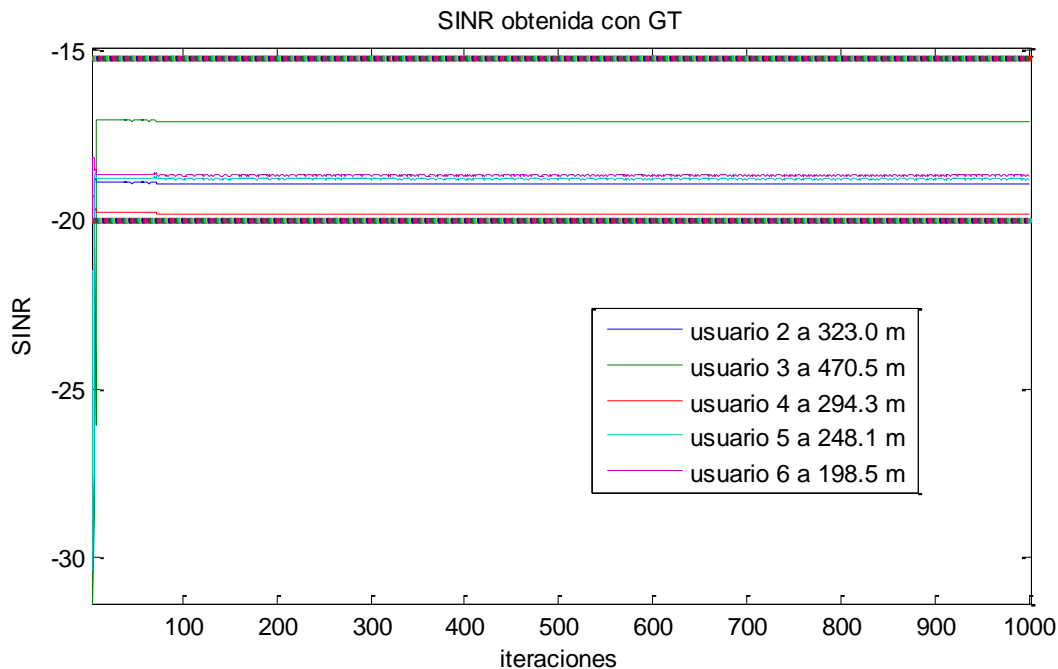


Figura 4.27 Variación de SINR Primer Caso Celda de Radio 500 m

En la figura 4.27, se puede observar que el sistema converge mucho más rápido que en los casos anteriores y que las fluctuaciones son mínimas, permitiendo que el sistema pueda atender casi a la totalidad de los UE presentes en la celda.

Con la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC) el sistema atiende 12 UE, que corresponde al 80% del total de los UE presentes al interior de la celda, este resultado se muestra en la figura 4.28, donde el radio de cobertura se reduce a 464 m teniendo en cuenta el 5% de probabilidad de degradación.

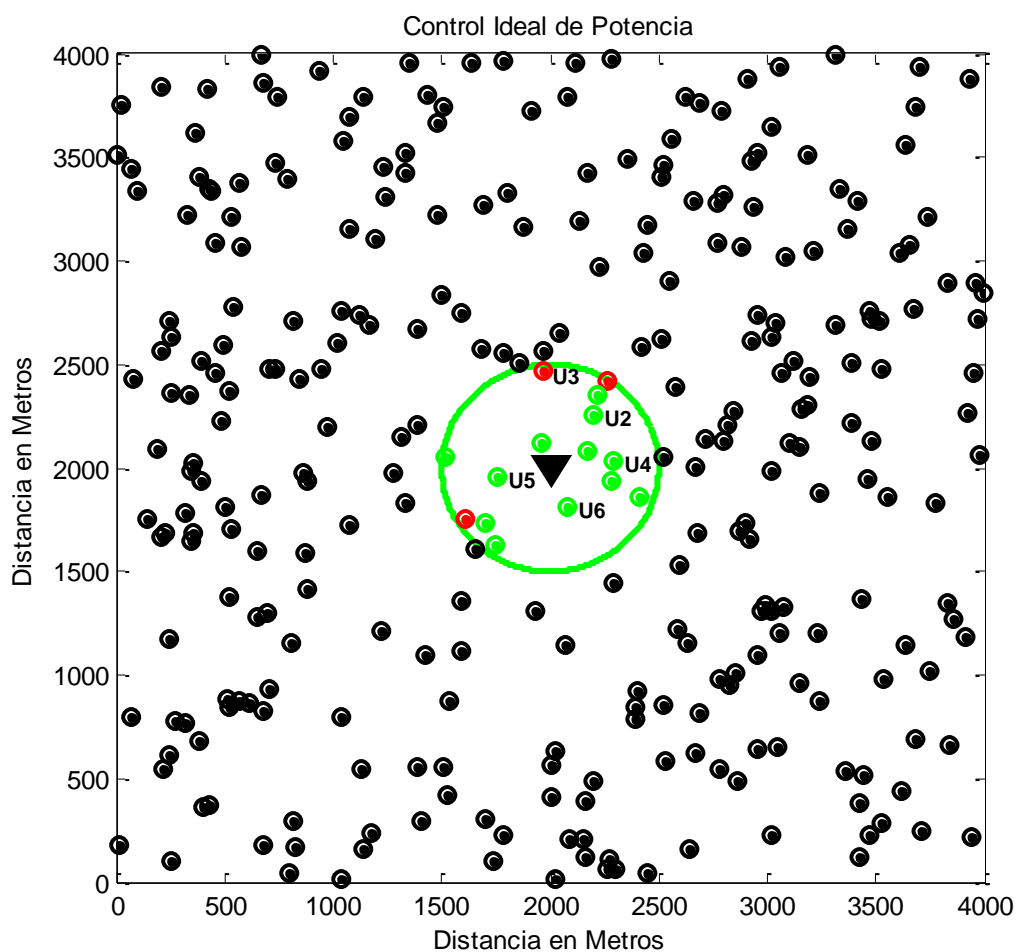


Figura 4.28 Resultado del Primer Caso con Control Ideal de Potencia

Observando la evolución de la probabilidad de degradación mostrada en la figura 4.29, se puede observar que el comportamiento del algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) es mejor que el del Control Ideal de Potencia (IPC), alcanzando una probabilidad de degradación de 0.06, mientras que el Control Ideal de Potencia (PC), obtiene un valor de probabilidad de 0.2.

Sin embargo, la tendencia muestra que cuando los requerimientos de SINR son bajos, el comportamiento de la Teoría de Juegos (GT) es adecuado, si se compara con los resultados obtenidos para el Control Ideal de Potencia (IPC).

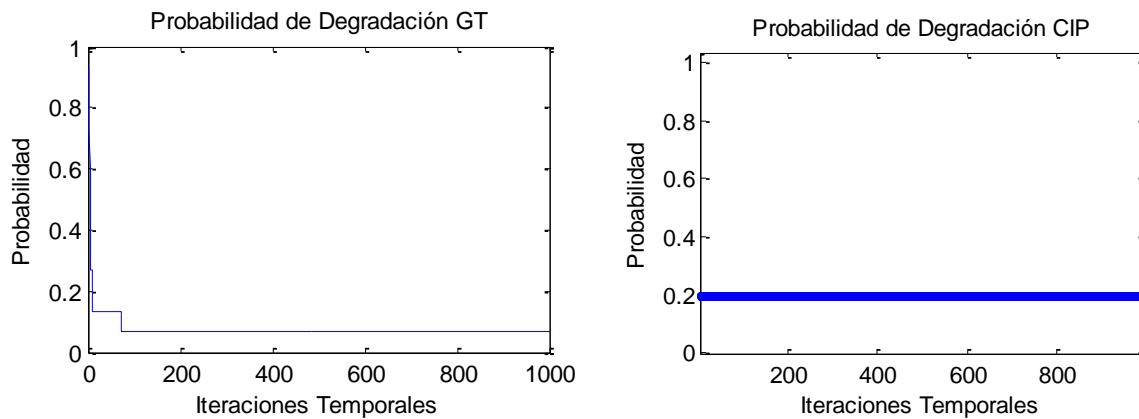


Figura 4.29 Probabilidad de Degradación Primer Caso para GT e IPC

Para el modelo basado en Teoría de Juegos (GT) la potencia de transmisión promedio generada por los UE con requerimientos de SINR satisfechos es de 10.63 mW o 10.26 dBm, mientras que para el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) es 9.29 mW o 9.68 dBm, generando un menor consumo de energía.

4.2.2 Segundo Caso

Al igual que para la celda de radio igual a 1 Km, se incrementa el SINR requerido de los UE a -14 dB, obteniendo los resultados que muestra la figura 4.30. Bajo estas condiciones el sistema atendió 12 UE que corresponden al 57.4% del total de 21 UE que se encuentran al interior de la celda. Comparado con el primer caso, el porcentaje de UE atendidos se disminuye debido al incremento del SINR requerido, lo que conlleva al incremento de la potencia de transmisión de los UE y esto genera niveles de interferencia superiores, dejando fuera de cobertura a una mayor cantidad de UEs, lo cual se evidencia con la reducción del radio de cobertura que para este caso es de 300 m.

La figura 4.31 muestra que el sistema requiere de un mayor tiempo de descubrimiento del entorno para seleccionar la potencia adecuada de transmisión, además se puede notar que las potencias utilizadas en esta configuración son superiores, incluso aquellos UE que están próximos requieren potencias superiores. En el caso de la figura 4.32 la potencia de transmisión necesaria es de 5 dBm.

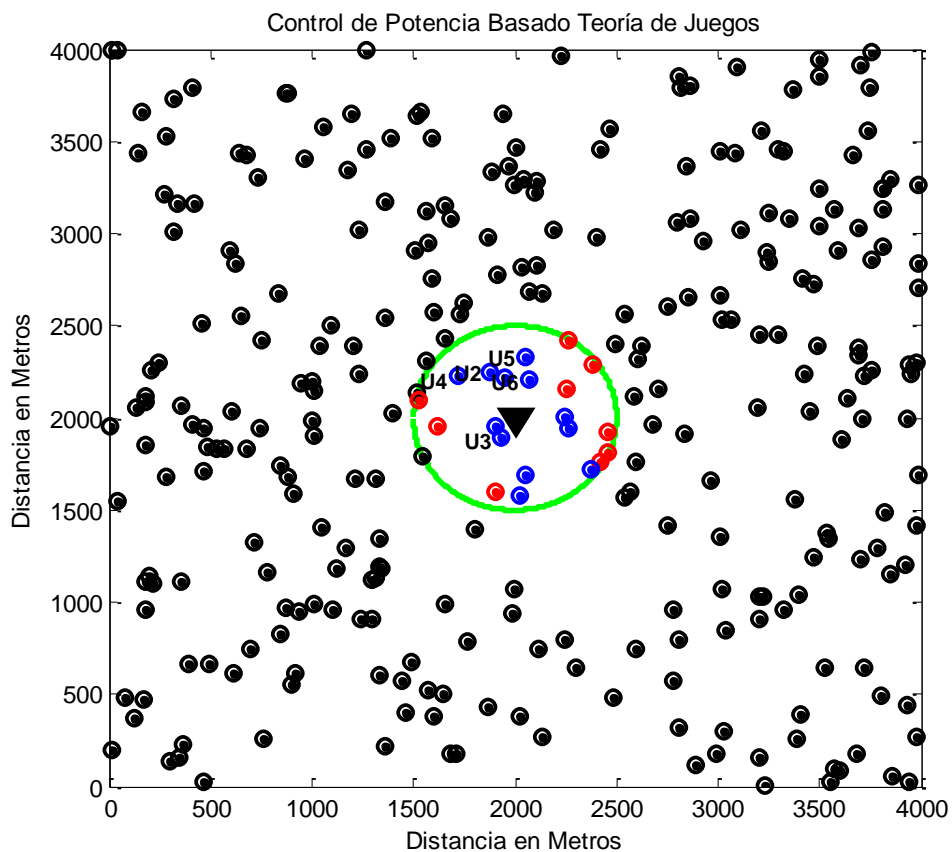


Figura 4.30 Resultado del Segundo Caso con Celda de Radio 500 m

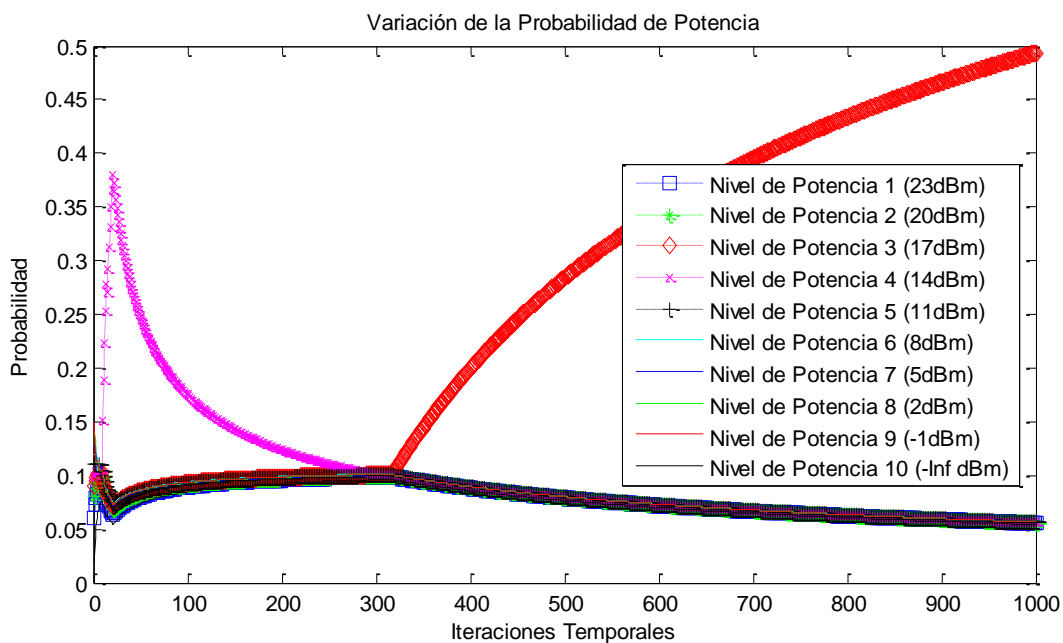


Figura 4.31 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 280.3 m

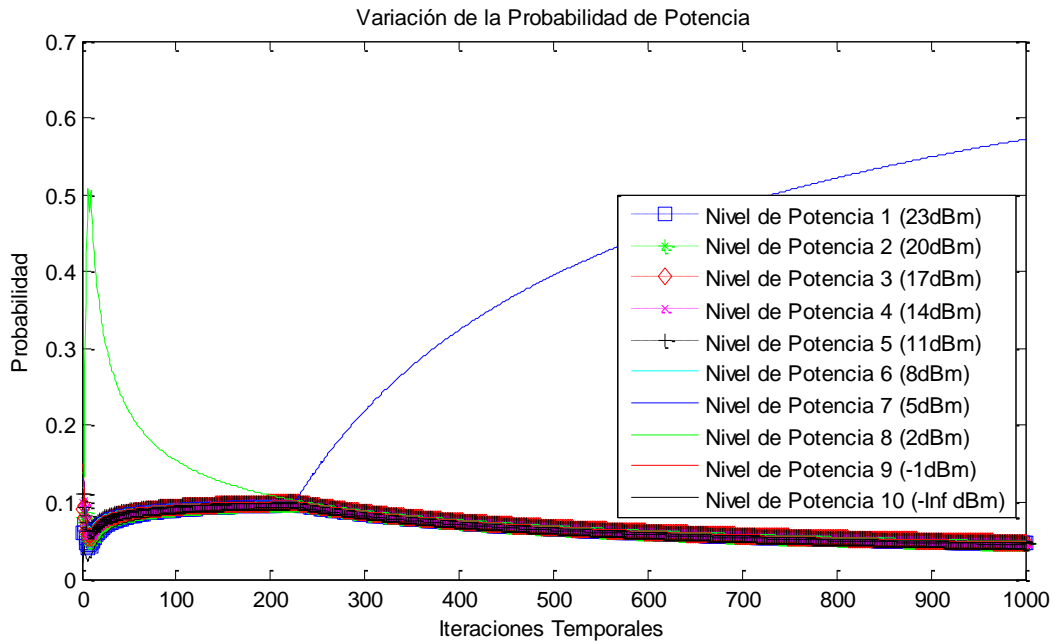


Figura 4.32 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 130.7 m

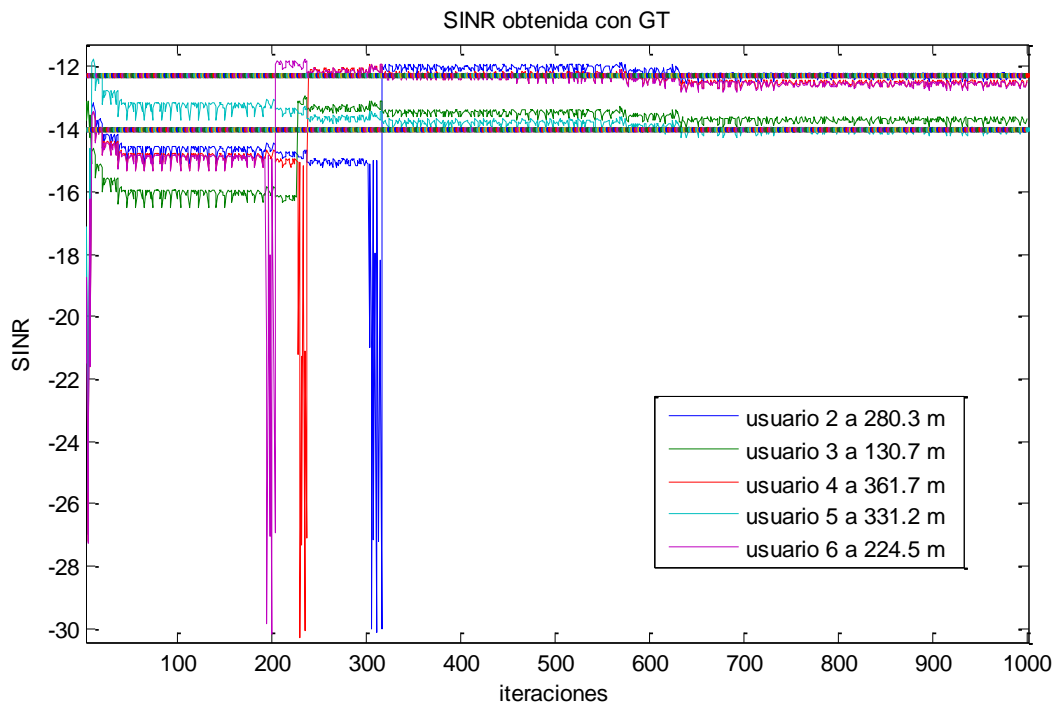


Figura 4.33 Variación de SINR Segundo Caso Celda de Radio 500 m

Se puede observar en la figura 4.33, que el sistema toma más tiempo hasta converger la SINR de los usuarios, además un cambio en el sistema genera mayores fluctuaciones, que las vistas en la figura 4.27 para el primer caso con celda de radio 1 Km.

Sin embargo, al comparar estos resultados con lo obtenido en la sección 4.1.2 para la celda de 1 Km, este sistema tiene un mejor desempeño en cuanto a capacidad, debido a que la reducción del tamaño de celda permite a la MBS ajustar de manera más eficiente la potencia de transmisión de los UE.

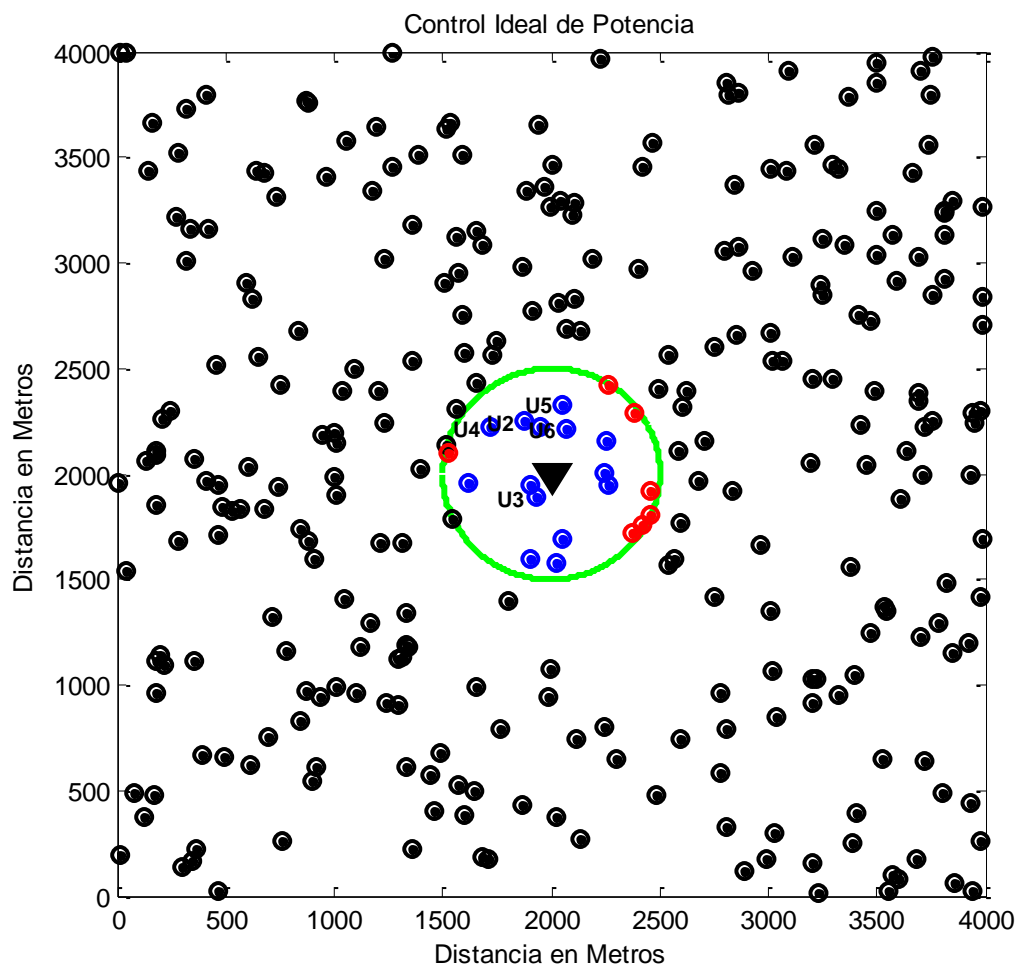


Figura 4.34 Resultado del Segundo Caso con Control Ideal de Potencia

Al aplicar Control Ideal de Potencia (IPC) al segundo caso, mostrado en la figura 4.34, el sistema tiene un mejor comportamiento atendiendo a 14 UE, lo cual corresponde al 66.67% del total de UEs al interior de la celda, con un radio de cobertura de 464 m. Cabe aclarar que los resultados de simulación son variables, existiendo casos en los que el comportamiento de los dos algoritmos fue igual o incluso algunos en los que la aplicación de la Teoría de Juegos (GT) obtuvo una mejor capacidad y cobertura. Los resultados mostrados son los que se presentan con mayor frecuencia.

Se puede observar en la figura 4.35, que la probabilidad de degradación para la aplicación del algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) y el Control Ideal de

Potencia (IPC), fue inferior al caso presentado en la sección 4.1.2, evidenciando que la inclusión de celdas de menor alcance incrementa la capacidad de los sistemas limitados por interferencia.

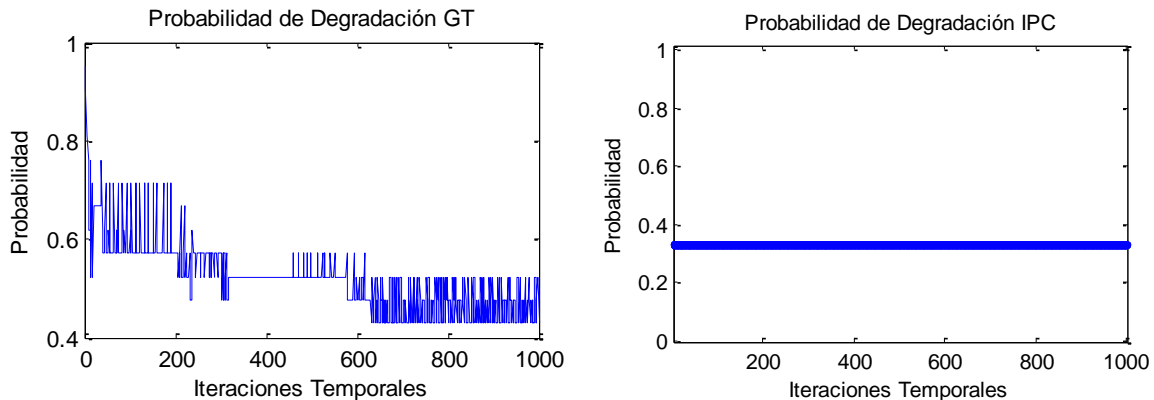


Figura 4.35 Probabilidad de Degradación Segundo Caso para GT e IPC

La potencia de transmisión promedio alcanzada con la aplicación del modelo basado en Teoría de Juegos (GT) es de 48.13 mW o 16.82 *dBm*, un valor menor al alcanzado por el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) que es de 66.42 mW o 18.22 *dBm*.

4.2.3 Tercer Caso

Para este caso se incluye en el escenario UEs con SINR requerida de -20 dB y -14 dB, el sistema atendió 17 UE (10 UE con SINR requerida de -20 dB y 7 UE con SINR requerida de -14 dB), lo cual corresponde aproximadamente al 77.3% del total de 22 UE que se encuentran al interior de la celda con un radio de cobertura de 349 m, como se muestra en la figura 4.36.

Al comparar este resultado con el resultado presentado en la sección 4.1.3, se nota que al reducir el tamaño de celda, el sistema puede atender con mayor facilidad a los UE que se encuentren al interior celda.

Las figuras 4.37 y 4.38 muestran que al incrementar la SINR requerida de los UEs, el algoritmo requiere un mayor tiempo para converger, mostrando la necesidad de cambiar la potencia de transmisión de acuerdo a los cambios en las condiciones del sistema.

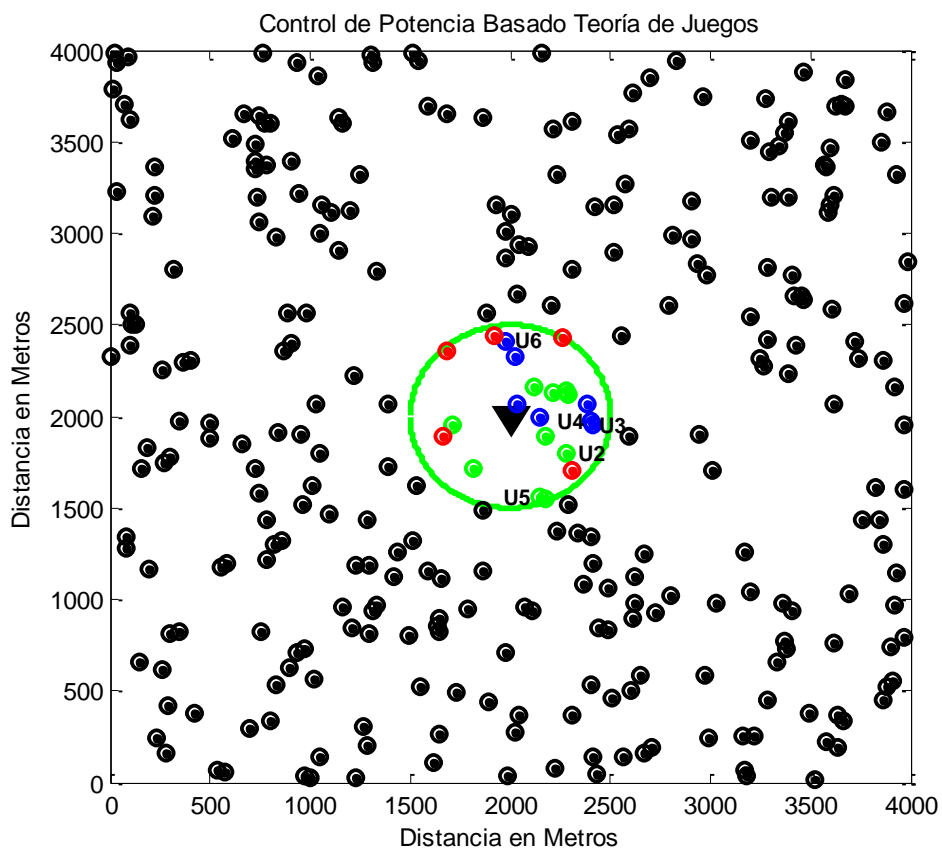


Figura 4.36 Resultado del Tercer Caso con Celda de Radio 500 m

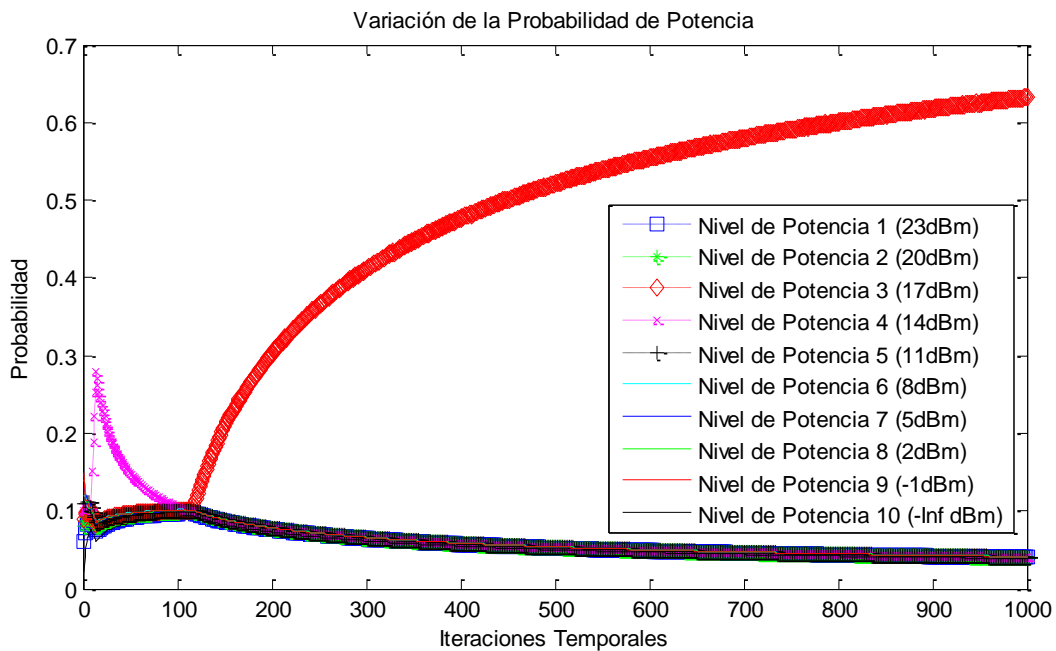


Figura 4.37 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 413 m

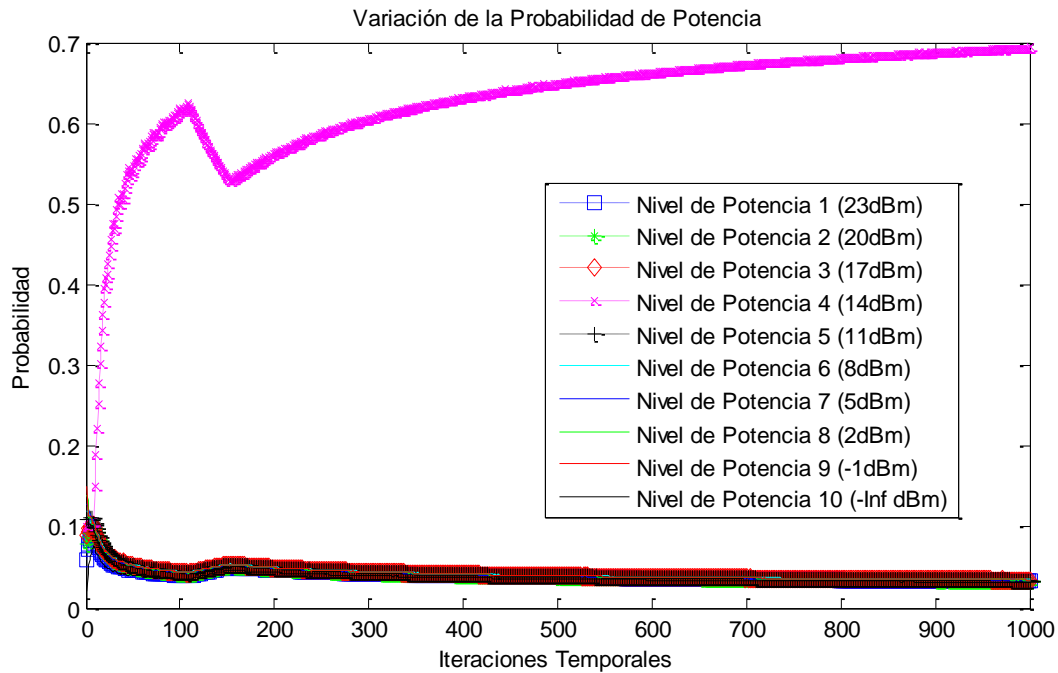


Figura 4.38 Variación de Probabilidad de Potencia UE a 342 m

En este tercer caso, los UE necesitan transmitir con mayor potencia para alcanzar la SINR de -14 dB requerida, generando un nivel de interferencia mayor para las comunicaciones de los UE SINR requerida de -20, y obligando a que estos utilicen una potencia de transmisión mayor.

En la figura 4.39 se puede ver que la SINR obtenida para este caso, dada la presencia de los UEs con mayores requerimientos de SINR, tiene mayores fluctuaciones que en el caso uno para la celda de 500 m, pero menores que en el segundo caso, sin embargo, el comportamiento del sistema es adecuado, ajustando los niveles de interferencia en los rangos permitidos (-20 dB a -15 dB y -14 dB a -12 dB). Al igual que en los casos anteriores, aquellos UE que se encuentran cercanos a la estación base transmitiendo con la mínima potencia, como el usuario 3 de la figura 4.39, generan una considerable interferencia afectando el desempeño del sistema.

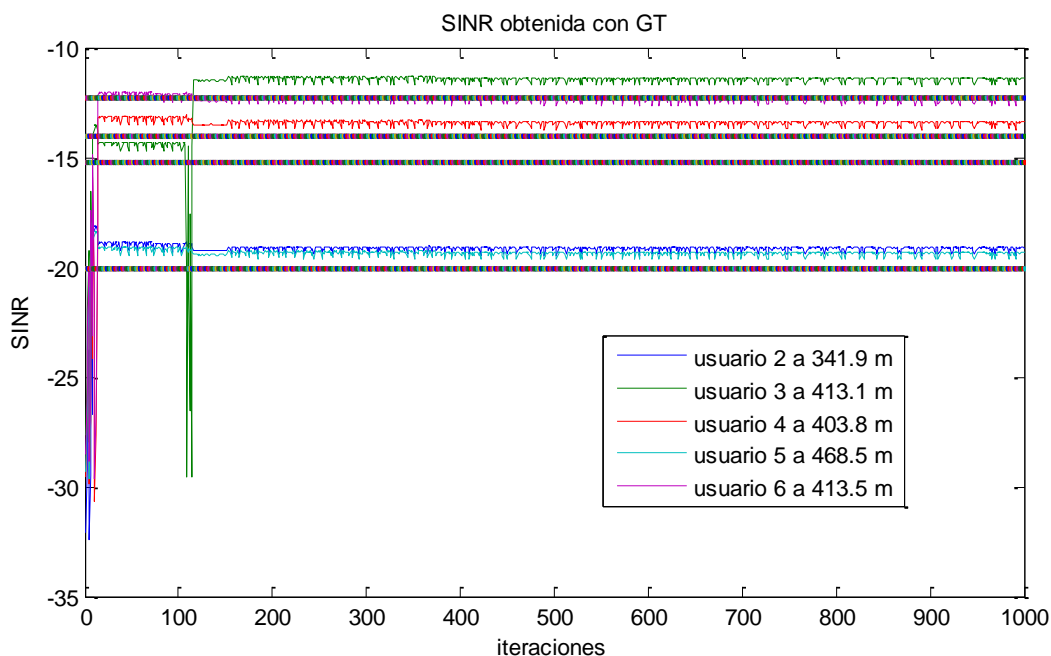


Figura 4.39 Variación de SINR Tercer Caso Celda de Radio 500 m

Al aplicar en este escenario el Control de Potencia (PC) se observa que el comportamiento es muy similar, teniendo casos en los cuales el sistema con Control Ideal de Potencia (IPC) atiende igual cantidad de usuarios que el sistema con Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT). En esta sección se presenta el resultado con mayor ocurrencia en el cual al aplicar Control Ideal de Potencia (IPC) se atiende una menor cantidad de usuarios.

Para el Control Ideal de Potencia el radio de cobertura del sistema es igual a 349 m, el sistema atiende 16 UE de los 22 que se encuentran al interior de la zona de cobertura de la celda, esto corresponde al 72.7% de los UE asociados a la MBS, un valor superior al obtenido en el segundo caso y al presentado en la sección 4.1.3, este resultado se muestra en la figura 4.40.

La probabilidad de degradación tanto para el algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) como para el que implementa Control Ideal de Potencia (IPC) bajó, con respecto al caso presentado en la sección 4.1.3, como se muestra en la figura 4.41.

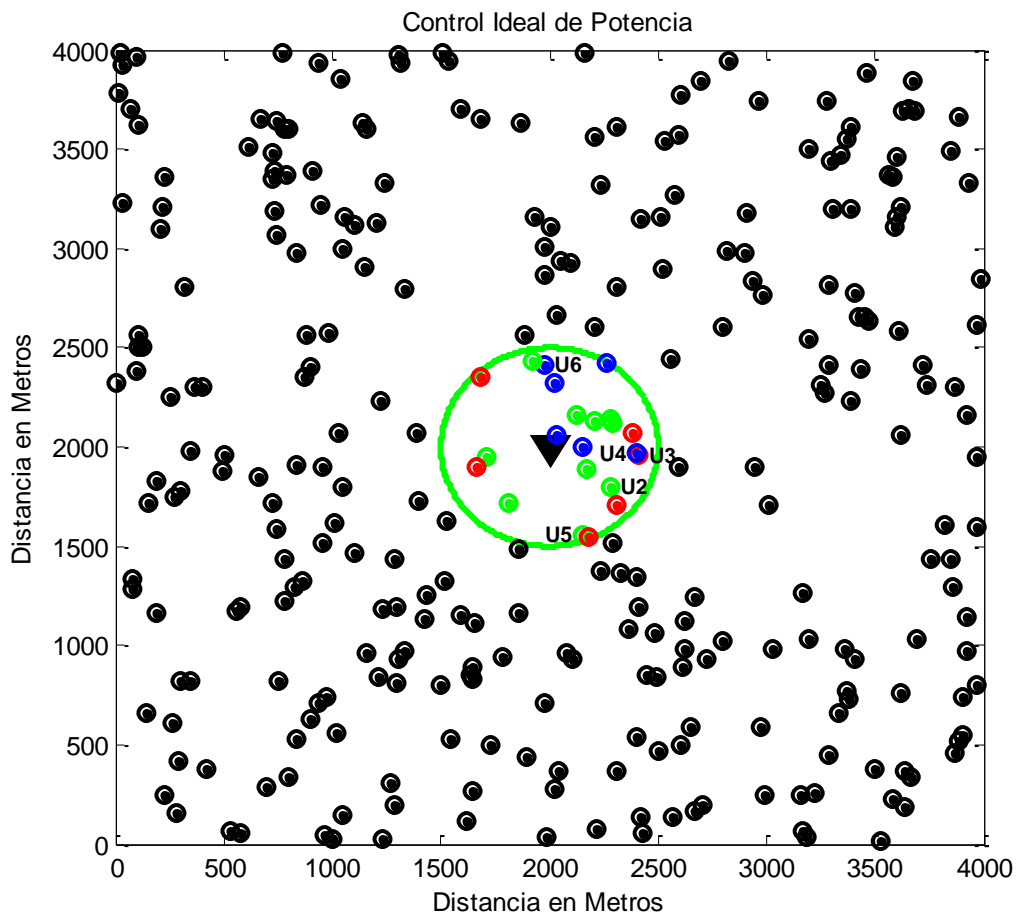


Figura 4.40 Resultado del Tercer Caso con Control Ideal de Potencia

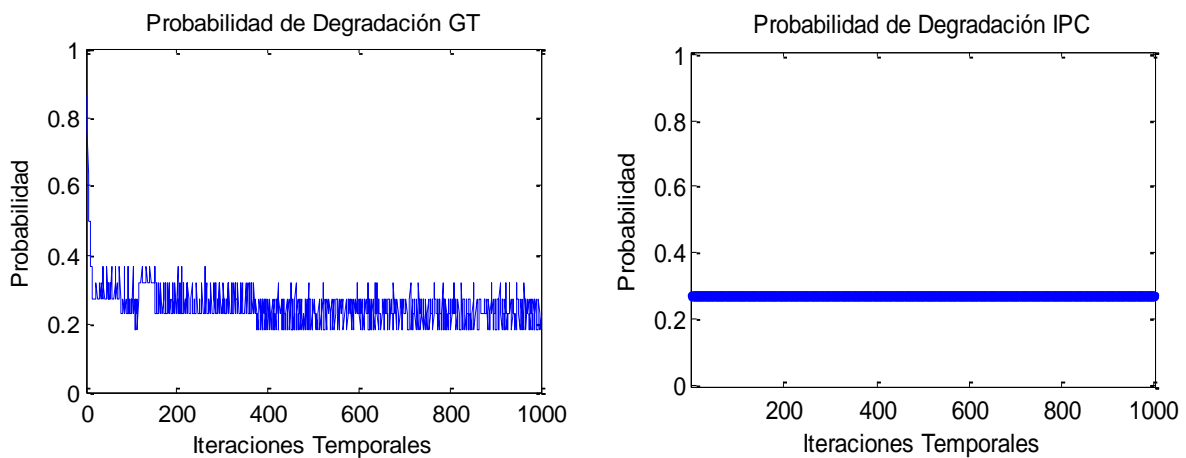


Figura 4.41 Probabilidad de Degradación Tercer Caso para GT e IPC

Para el tercer caso, la potencia de transmisión promedio alcanzada con la implementación del modelo basado en Teoría de Juegos (GT) es de 18.57 mW o

12.69 dBm y para el modelo de Control Ideal de Potencia es de 23.62 mW o 13.73 dBm, obteniendo con los dos modelos resultados similares.

4.3 RESUMEN

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas, donde se nota de forma general que el comportamiento del sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas, que implementa el modelo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT), es bueno en comparación a la implementación del Control Ideal de Potencia (IPC), obteniendo en la mayoría de los casos una mayor capacidad y radio de cobertura.

Tabla 4.1 Tabla Resumen de Resultados

		Celda de 1 Km				Celda de 500 m			
		Probabilidad de Degradación	Capacidad	Radio de Cobertura	Potencia Promedio (dBm)	Probabilidad de Degradación	Capacidad	Radio de Cobertura	Potencia Promedio (dBm)
Caso 1	GT	0.37	63%	461 m	17.51	0.06	93.3%	500 m	10.27
	IPC	0.43	56.67%	420 m	17.19	0.2	80 %	464 m	9.68
Caso 2	GT	0.8	16.67%	330 m	19.89	0.43	57.4%	300 m	16.82
	IPC	1	0%	0 m	-	0.34	66.67%	464 m	18.22
Caso 3	GT	0.66	35.1%	613 m	19.8	0.23	77.3%	349 m	12.69
	IPC	1	0%	0 m	-	0.27	72.7%	349 m	13.73

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

La simulación a nivel de sistema permite analizar desde una perspectiva más general el comportamiento de un sistema, permitiendo modelar características que una simulación a nivel de enlace no puede tener en cuenta, como el uso global de recursos o el estado de las comunicaciones de los usuarios presentes en un sistema de comunicaciones.

Se nota en las pruebas que el tamaño de la celda tiene un alto impacto en la cobertura de un sistema limitado por interferencia, tal que en un sistema con problemas de cobertura, es recomendable reducir el tamaño de celda e incrementar la cantidad de celdas. De igual manera el tamaño de celda también depende del valor de SINR requerida por los UEs, esto se evidencia en los resultados del caso dos para los dos tamaños de celda, donde la celda de menor radio, tiene la posibilidad de atender una mayor cantidad de UE con mayor SINR, que en la celda de mayor radio.

Los resultados del caso uno para los dos radios de celda implementados, evidencian que sistemas que tienen un alto grado de tolerancia a interferencia pueden utilizar celdas de radios grandes, facilitando cubrir grandes regiones con pocas MBS.

La aplicación de la Teoría de Juegos (GT) como herramienta para modelar el procedimiento de Control de Potencia (PC) demuestra ser una muy buena alternativa de análisis, ajustando de manera adecuada los niveles de potencia de transmisión para mantener los niveles de interferencia en rangos adecuados para los servicios ofrecidos. Además, la aplicación del Aprendizaje Reforzado (RL) dentro del modelo basado en Teoría de Juegos (GT), permite sin la necesidad de cooperación directa, tener un conocimiento del comportamiento del sistema y ajustar de mejor manera los niveles de potencia de transmisión.

El ajuste de potencia realizado desde la estimación de la probabilidad permite, hacer un uso eficiente de la energía de los dispositivos móviles, lo cual se nota cuando el cambio se realiza únicamente en el instante en que los dispositivos experimentan

variaciones en el nivel de SINR, procurando no exceder los límites de SINR establecidos y permitiendo que más usuarios puedan ser atendidos.

La inclusión del Aprendizaje Reforzado (RL) en los sistemas de comunicaciones permite tomar decisiones más eficientes en los procedimientos de selección o asignación de recursos, como se observa en las figuras de variación de probabilidad. De igual manera dichas decisiones se ajustan progresivamente de acuerdo a las condiciones del entorno, procurando mejorar el desempeño del sistema.

La reducción del tamaño de celda permite que las potencias de transmisión utilizadas sean menores, reduciendo los niveles de interferencia que experimentan comunicaciones vecinas y el impacto ambiental que generan los sistemas de comunicaciones.

Al comparar los resultados obtenidos con el algoritmo basado en Teoría de Juegos (GT) con los obtenidos con Control Ideal de Potencia (IPC), la Teoría de Juegos (GT) permite un mejor ajuste, debido a que conociendo los niveles discretos de potencia, adecua el sistema garantizando servicios que cumplan con una SINR requerida, por su parte el Control Ideal de Potencia (IPC) calcula unos valores de potencia y los aproxima a los valores discretos definidos, lo cual genera niveles de interferencia superiores y por ende un comportamiento inadecuado del sistema de comunicaciones móviles e inalámbricas.

De las figuras de variación de probabilidad de potencia de transmisión, se puede concluir que la aplicación del Aprendizaje Reforzado (RL) en el modelo de Control de Potencia (PC) basado en Teoría de Juegos (GT) permite que la SINR converja con pocas iteraciones del algoritmo haciendo un uso eficiente de la energía.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

De la experiencia obtenida durante el desarrollo de la tesis, se proponen los siguientes trabajos:

- Aplicación del modelo definido a todas las celdas del escenario de simulación y analizar comparativamente con el presente trabajo, la cobertura, capacidad y degradación del sistema.
- Asignación de frecuencia implementando el modelo basado en Teoría de Juegos (GT) definido, procurando hacer uso eficiente del espectro en situaciones en las que el nivel de interferencia presente en el sistema sobrepase los rangos permitidos (Balanceo de Carga).

- Modificación del escenario de simulación, incluyendo movilidad en los UE ubicados de manera aleatoria, analizando el impacto que tiene la movilidad de los usuarios sobre la cobertura del sistema y los tiempos de convergencia.
- Análisis de capacidad vista como la velocidad promedio alcanzada por los UE en el sistema de comunicaciones.
- Comparar el Control de Potencia (PC) basado en Teoría Juegos (GT), con la aplicación de otras herramientas matemáticas que permitan modelar situaciones de conflicto como el enjambre de partículas.
- Aplicar un modelo de juego cooperativo y comparar los resultados con el modelo definido.

REFERENCIAS

- 3GPP. (2012). TS 25.101: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD). Technical Specification, 3rd Generation Partnership Project (3GPP TM), V11.3.0, pp. 23-24.
- Adibi, M. and Vakili, V. (2007). A Game Theoretic Approach for SINR-Constrained Power Control In 3G Cellular CDMA Communication Systems,” 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC).
- Astaiza, E., Bermudez, H. y Muñoz, P. (2007). Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones. Arte e Imagen.
- Bennis, M. y Pelaza S. (2011). Decentralized Cross-Tier Interference Mitigation in Cognitive Femtocell Networks. IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-5.
- Calabuig, S. (2010). Common Radio Resource Management Strategies for Quality of Service Support in Heterogeneous Wireless Networks. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Carneiro, G., et al. (2005). The DAIDALOS Architecture for QoS over Heterogeneous Wireless Networks. *14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*.
- Debreu, G. (1952). A Social Equilibrium Existence Theorem. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 38, 886–893.
- ETSI. (1998). TR 101 112: Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS. Reporte Técnico, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Versión 3.2.0.
- Goodman, N. y Mandayam, G. (2001). Network assisted power control for wireless data. IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring, vol. 2, pp.1022 – 1026.
- Halder, N. and Song, J. (2007). Game Theoretical Analysis of Radio Resource Management in Wireless Networks: A Non-Cooperative Game Approach of

- Power Control. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol.7 No.6, pp. 184-192.
- Kakemizu, M. y Chugo, A. (2009). Approaches to Green Networks. Fujitsu Laboratories Ltd., Fujitsu Sci.Tech, Japan, vol. 45, pp.398 - 403.
- Kelly, A. (2003) Decision Making Using Game Theory, an introduction for managers. Cambridge University Press, New York.
- Koskie, S. and Gajic, Z. (2005). A Nash Game Algorithm for SIR-Based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks. *IEEE Transactions on Networking*, vol. 13, no. 5.
- Lasaulce, S. y Tembine, H. (2011). Game Theory and Learning for Wireless Networks: Fundamentals and Applications. Academic Press, Elsevier.
- Mendo, L. (2001). Capacidad en Sistemas Celulares W-CDM. Tesis Doctoral, Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid.
- Meshkati, F., et al. (2006). A Game-Theoretic Approach to Energy-Efficient Power Control in Multicarrier CDMA Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 6, pp. 1115-1129.
- Myerson, R. (1991). Game Theory: Analysis of Conflict. London, England: Harvard University Press.
- Nash, J. (1951) Non Cooperative Games. Disertación para optar al título de Doctorado, Princeton University.
- Neumann, J. y Morgenstern, O. (1944). Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, Princeton University Press.
- Osborne, M. (2002). An introduction to game theory. Draft chapter, Oxford University Press.
- Perlaza, S. et al. (2010). Satisfaction Equilibrium: A General Framework for QoS Provisioning in Self-Configuring Networks, eprint arXiv:1007.5170.
- Perlaza, S., Tembine, H., Lasaulce, S. y Debbah, M. (2012). Quality Of Service Provisioning in decentralized Networks A satisfaction Equilibrium Approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 6, pp. 104 - 116.
- Pillutla, L. S. y Krishnamurthy, V. (2008). Game theoretic rate adaptation for spectrum overlay cognitive radio networks. *IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1 - 5.

- Quintero, V. (2010). Evaluación del Desempeño de Sistemas de Comunicación Móvil Celular de Tercera Generación – WCDMA. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca.
- Rahman, et al. (2007). Radio Resource Management in 3G UMTS Networks. Blekinge Institute of Technology.
- Rasmusen, E. (2005). Games and information: An introduction to game theory, Indiana University, Bloomington, BlackWell Publishers Ltd., Fourth Edition.
- Romp, R. (1997). Game Theory: Introduction and applications, Oxford University Press, University of Central England Birmingham, 1997.
- Rose, L., Perlaza, S. y Debbah, M. (2011). On the Nash Equilibria in Decentralized Parallel Interference Channels, arXiv:1106.2650, presented in ICC Kyoto 2011.
- Ross, S y Chaib-draa, B. (2006). Learning to Play a Satisfaction Equilibrium. Computer Science Department, PLT Bdg, Laval University Québec, PQ, Canada.
- Ross, S. y Chaib-draa, B. (2006). Satisfaction Equilibrium: Achieving Cooperation in Incomplete Information Games. In Proc. Canadian Conference on AI, pp.61-72.
- Saad, W., Han, Z., Poor, H.V. y Basar, T. (2012). Game Theoretic Methods for the Smart Grid. In proceedings IEEE Signal Processing Magazine. arXiv:1202.0452v1[cs.IT].
- Singh, S y Bertsekas, D. (1996). Reinforcement Learning for Dynamic Channel Allocation in Cellular Telephone Systems. In Advances in Neural Information Processing Systems: Proceedings of the 1996 Conference, MIT Press, pp. 974 – 980.
- Tembine, H and Lasaulce, S. and Jungers, M. (2010). Joint power control-allocation for green cognitive wireless networks using mean field theory, IEEE Proc. of the 5th Intl. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CROWNCOM, Cannes, France.
- Xing, Y. y Chandramouli, R. (2008). Stochastic learning solution for distributed discrete power control game in wireless data networks. IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 16, no. 4, pp. 932–944.
- Zermelo, E. (1913), Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels. in Proceedings of the Fifth International Congress of Mathematicians, Cambridge University Press, vo. 2, pp. 501-504.