

# CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

## POWER CONTROL BASED ON GAME THEORY IN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM



### AUTOR

VICTOR FABIAN MIRAMA PEREZ  
Magister en Electrónica y  
Telecomunicaciones  
\*Universidad del Cauca  
Docente Temporal  
Grupo de Radio e InAlámbricas (GRIAL)  
vmirama@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

### AUTOR

VICTOR MANUEL QUINTERO FLOREZ  
Magister en Ingeniería área Electrónica y  
Telecomunicaciones  
\* Universidad del Cauca  
Docente Titular Universidad del Cauca  
Coordinador del Grupo de Radio e InAlámbricas  
(GRIAL)  
Miembro Profesional IEEE  
vflorez@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

### \*INSTITUCIÓN

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
UNICAUCA  
Universidad pública  
Carrera 2 con Calle 15 norte esquina  
Sector Tulcán  
Edificio Ingenierías  
Popayán, Cauca  
decafiet@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO:** Los resultados presentados hacen parte de la tesis de maestría titulada Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos.

**RECEPCIÓN:** 3 de Mayo de 2016

**ACEPTACIÓN:** 10 de Julio de 2016

**TEMÁTICA:** Comunicaciones móviles

**TIPO DE ARTÍCULO:** Artículo de investigación científica e innovación.

**Forma de citar:** Mirama Perez, V. F. (2016). Control De Potencia Basado En Teoría De Juegos En sistemas de comunicaciones inalámbricas. En R, Llamosa Villalba (Ed.). Revista Gerencia Tecnológica Informática, 15(42), 69-78. ISSN 1657-8236.

**RESUMEN ANALÍTICO**

Cada vez existen mayores exigencias en cuanto a la cobertura, capacidad y calidad de los servicios ofrecidos por los sistemas de comunicaciones móviles. Lo anterior exige a fabricantes y operadores la implementación de procedimientos de Gestión de Recursos Radio, que permitan hacer un uso eficiente de los recursos con los que cuenta una red. El artículo analiza la aplicación del control de potencia en una red de única portadora haciendo uso de la Teoría de Juegos (GT) y teoremas de inteligencia artificial como el Aprendizaje Reforzado (RL) para analizar aspectos relacionados a la cobertura y capacidad, asegurando la calidad de los servicios ofrecidos.

**PALABRAS CLAVES:** Redes móviles, control de potencia, sistema limitado por interferencia, teoría de juegos.

**ANALYTICAL SUMMARY**

There are high demands in coverage, capacity and quality of services of mobile communication systems, Manufacturers and operators have to implement procedures Radio Resource Management, which allow efficient use of network resources. The article discusses the application of power control in a single carrier network using Game Theory (GT) and artificial intelligence theorems like Reinforcement Learning (RL) to discuss issues related to the coverage and capacity, ensuring the quality of services offered.

**KEYWORDS:** Mobile Networks, power control, interference limited system, Game Theory.

**INTRODUCCIÓN**

En la actualidad los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos crecen rápidamente conforme los avances tecnológicos se van presentando, sin embargo, existen diferentes limitaciones como la frecuencia de operación y el ancho de banda. Adicionalmente existen limitaciones intrínsecas tales como el ruido, la interferencia, la variabilidad del canal de comunicaciones y la limitada potencia de los dispositivos móviles. Debido a estas restricciones es necesario la definición e implementación de procedimientos que permitan hacer uso eficiente de los recursos radio [1].

En el campo de las telecomunicaciones se buscan continuamente alternativas para utilizar de manera eficiente los recursos radio, por ello se definen de manera general procedimientos de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), los cuales se diseñan de acuerdo a las características específicas de cada sistema, por lo cual su implementación no ha sido estandarizada.

El uso eficiente de la energía en los sistemas actuales es de gran importancia, debido a la necesidad de optimizar su uso en los dispositivos móviles y en el ofrecimiento de servicios en los sistemas de comunicaciones móviles.

Por este motivo es de interés para el presente artículo el Control de Potencia (PC, *Power Control*), dado que como lo muestran diferentes investigaciones [1]-[5], el control adecuado de ésta, puede incrementar la capacidad y la calidad en la prestación de servicios en un sistema de comunicaciones móviles e inalámbricos, además, aumenta el tiempo de vida útil de las baterías de los dispositivos móviles y reduce el impacto ambiental causado por los desechos tecnológicos y el posible efecto de la radiación no ionizante sobre seres vivos [6], [7].

Para mejorar el uso de la potencia en las redes de comunicaciones, existen diferentes alternativas [3], [6]-[11], en las cuales se busca reducir tanto como sea posible el consumo de energía, sin degradar la calidad del servicio ofrecido, ni causar sobrecarga en el sistema, brindando el servicio a la mayor cantidad de usuarios posible. Una de estas alternativas, aunque no exclusivamente para el Control de Potencia, es la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*), la cual ha tomado gran importancia debido a los satisfactorios resultados obtenidos [1]-[5], [8], [9]. No obstante 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) [12].

En [2] los autores modelan el control de potencia en un sistema de comunicaciones basado en CDMA utilizando teoría de juegos, obteniendo que el algoritmo funciona de forma aceptable con 9 usuarios, pero que su implementación práctica puede tener inconvenientes.

En [3] se define un modelo de control de potencia basado en teoría de juegos y se obtienen las posibles soluciones, posteriormente se modela un proceso de asignación de canal basado igualmente en teoría de juegos, el escenario de pruebas con dos usuarios mostró que es posible el modelamiento de este tipo de sistemas.

Una manera novedosa de modelo basado en teoría de juegos se presenta en [4], donde el beneficio requerido es la velocidad de transmisión, mostrándose que una adecuada asignación de potencia mejora o mantiene la calidad de servicio, de un sistema. La definición del modelo empleada aporta al trabajo desarrollado la inclusión de nuevas alternativas de solución para un juego y se estudia la capacidad del sistema vista como cantidad de usuarios.

Otra alternativa de aplicación al control de potencia se presenta en [5], donde se estima la velocidad alcanzada por los usuarios de una red CDMA, al implementar el control de potencia en un juego discreto, las pruebas se realizaron con dos usuarios, y se analiza la obtención de diferentes tipos de equilibrios.

Trabajos como [6], [7] y [8], combinan el control con la asignación de potencia, para mejorar el desempeño del sistema y obtienen resultados adecuados. Cabe resaltar que los trabajos mencionados realizan pruebas con una cantidad pequeña de usuarios, en cambio, en este artículo se aplica la teoría de juegos a un sistema con una mayor cantidad de usuarios en condiciones de alta interferencia.

En este artículo se presenta un modelo, a nivel de sistema mediante Teoría de Juegos (GT), del Control de Potencia en un sistema de comunicaciones limitado por interferencia en su enlace de subida, donde cobra mayor importancia el control adecuado de potencia, debido a que todos los usuarios comparten una única portadora y es de vital importancia obtener una Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference Plus Noise Ratio*) adecuada para un correcto acceso por parte de los usuarios a los servicios ofrecidos. Además, se incluye el Aprendizaje Reforzado (RL, *Reinforcement Learning*) como una alternativa que proporcione mayor confiabilidad en los resultados obtenidos en la experimentación.

En la sección 1, se presentan los conceptos fundamentales para abordar la Teoría de Juegos (GT), en la sección 2, se describe el modelo basado en Teoría de Juegos (GT), las características del escenario de simulación implementado y el comportamiento del algoritmo definido, en la sección 3 se describen los casos de estudio utilizados durante la experimentación y los resultados obtenidos, en la sección 4 se presentan las principales conclusiones obtenidas.

## 1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TEORÍA DE JUEGOS

### 1.1 TEORÍA DE JUEGOS

La Teoría de Juegos (GT) se define como una herramienta matemática utilizada para modelar y analizar el comportamiento de situaciones estratégicas en un entorno definido, el cual está conformado por un conjunto de entidades, llamadas jugadores, que pueden estar en contienda o en negociación para obtener el mayor beneficio de un recurso o actividad, definiendo así dos tipos de juegos: los cooperativos y los no cooperativos [12] - [14].

En los juegos cooperativos las entidades se comunican para obtener o maximizar un beneficio grupal, mientras que en los no cooperativos, cada entidad toma sus decisiones procurando maximizar sus beneficios sin tener en cuenta a las demás entidades [12]-[14].

Los estudios sobre Teoría de Juegos (GT) cobraron especial importancia con los postulados establecidos por Neumann, Morgenstern y Nash, siendo este último quien propuso el concepto del Equilibrio de Nash (NE, *Nash Equilibrium*), como solución a un problema representado mediante Teoría de Juegos (GT) [15], [16].

### 1.2 EQUILIBRIO DE SATISFACCIÓN

En ciertos tipos de juegos no es necesario maximizar el beneficio, basta con que los jugadores superen un umbral de beneficio obtenido. 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 [2], [12].

Ross y Chaib-dra introducen el Equilibrio Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*), en el cual aquellos individuos que satisfacen sus requerimientos u obtienen

el mínimo beneficio aceptable, no querrán cambiar su estrategia, mientras que aquellos que aún no han satisfecho sus necesidades seguramente cambiarán 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 [17].

### 1.3 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 decisiones que le permitan sacar el mejor provecho o recompensa, de acuerdo con las condiciones del entorno que lo rodea [12], [16], [17].

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 investigación porque la inclusión del Aprendizaje Reforzado (RL) permite seleccionar de manera dinámica y aproximada los niveles de potencia de transmisión que establezcan el desempeño del sistema de comunicaciones móviles e inalámbrico [17], [18].

## 2. MODELO DE JUEGO

### 2.1 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 serán representadas con letras minúsculas.

### 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

Se considera el conjunto de  $M = \{1, \dots, M\}$  Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*) que se encuentran en un sistema microcelular limitado por interferencia y el

conjunto de  $N = \{1, \dots, N\} \in M$  UE que se encuentran asociados a la Micro Estación Base (MBS, *Micro Base Station*) para el análisis de los enlaces de subida, los cuales operan sobre una frecuencia fija.

La MBS coordina la operación del sistema proporcionando a cada UE la información necesaria para su configuración. Se define el conjunto  $P_n$  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 un instante de tiempo  $t \in \{1, \dots, \infty\}$ , representado por el vector  $p = \{p_1, \dots, p_N\} \in P$ , con  $P = P_1 \times \dots \times P_N$ .

El conjunto  $\Gamma = \{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N\}$ , representa la mínima utilidad requerida por cada uno de los UE.

### 2.3 MODELO

Para la definición del modelo de control de potencia se utiliza una representación como juego estratégico que se desarrolla en cada instante de tiempo  $t$ , denotado como  $G = (N, \{P_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N})$ , donde  $N$  representa al conjunto de usuarios al interior de la microcelda,  $P_n$  es un conjunto de estrategias que corresponde a un conjunto discreto de potencias de transmisión configurables por el UE y  $u_n$  es el beneficio obtenido por el UE  $n$  al aplicar una estrategia  $p_n \in P_n$  o también llamado función de utilidad.

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

El desarrollo del juego sigue la siguiente estructura:

1. En el instante  $t = 0$ , cada UE selecciona una estrategia 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 son configurados al inicio del algoritmo. La MBS determina la utilidad alcanzada por cada UE con la estrategia seleccionada. Para el modelo de juego la función de utilidad corresponde con la SINR obtenida, definida por la ecuación 1.

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

Donde  $\alpha_n$  corresponde a las ganancias del sistema que tienen en cuenta el modelo de propagación y el desvanecimiento por sombra presente en el canal modelado con una variable aleatoria con distribución normal,  $\eta$  es la potencia de ruido térmico e  $i_0$  es la

interferencia causada por los UE fuera de la microcelda de análisis, definida por la ecuación 2.

$$i_0 = \sum_{j=N+1}^M \alpha_j p_{ij} \quad (2)$$

2. Para  $t > 0$ , retomando y adaptando lo establecido por Perla et al. [5], [19], cada UE calcula un valor  $b_{n,t}$  utilizando la ecuación 3.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + u_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (3)$$

Donde  $M_n$  corresponde al valor máximo que puede tomar la función de utilidad,  $u_{n,t-1}$  es la SINR obtenida en el instante anterior y  $\Gamma_n$  es la mínima SINR requerida por cada UE. Con el valor de  $b_{n,t}$  se actualizan los valores de probabilidad de  $\pi_n(t)$  y posteriormente el UE analiza si es necesario cambiar de acción, de acuerdo a los criterios definidos en la ecuación 4.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)), & \text{si } \beta \geq u_{n,t} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)) & \text{otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

Donde  $\beta$  depende de la tolerancia del sistema a la interferencia. En caso de que se satisfaga los requerimientos del UE, la probabilidad se actualiza con la ecuación 5.

$$g'(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t)=p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (5)$$

En el caso contrario la probabilidad se actualiza con la ecuación 6.

$$g(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t) \neq p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (6)$$

$\lambda_{n,t} = \frac{1}{t+1}$  es la tasa de aprendizaje para cada UE [5].

Según el resultado anterior cada UE selecciona la estrategia, para este caso la potencia de transmisión, de acuerdo a los cambios efectuados en  $\pi_n(t)$  y se regresa al paso 2 hasta alcanzar, si es posible, un SE.

Para el sistema implementado se realiza una adaptación al SE dado que a pesar de haber definido modelado el juego como no cooperativo, la inclusión del aprendizaje reforzado permite que los UE racionales estén satisfechos con un valor de utilidad superior al requerido, sin exceder su valor. Por tanto se impone sobre el SE definido en [17] una cota superior que evite el exceso de interferencia causada por un UE.

**Definición 1.** Un perfil de acción  $\mathbf{p}^* = \{p_1^*, \dots, p_N^*\} \in P$ , representa un SE si para una función de satisfacción  $sf(\mathbf{p})$  se cumple la ecuación 7.

$$sf(\mathbf{p}^*) = \{p_n^* \in P_n : \beta \geq u_n(p_n^*) \geq \Gamma_n, \forall n \in N\} \quad (7)$$

Con esta definición, la aplicación del algoritmo basado en GT, provoca que los usuarios cambien su estrategia cuando no alcanzan la utilidad requerida o cuando exceden el máximo valor permitido, el cual depende de la tolerancia del sistema a la interferencia.

De esta manera, bajo la restricción impuesta para la función de utilidad, el juego se redefine e identifica por la ecuación 8.

$$G = (N, \{P_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}, \{sf_n\}_{n \in N}). \quad (8)$$

### 3. EXPERIMENTACIÓN

Para el proceso de experimentación se generó un código en Matlab donde se representó un escenario de dimensiones 4Km x 4Km, tiene en cuenta la participación de 300 UE, los cuales se ubican de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme. Para las diferentes pruebas se tomaron dos valores de requerimientos de SINR  $-20dB$  y  $-14dB$ .

En el escenario se identificaron de color negro los usuarios asociados a otras estaciones base, de color verde los usuarios al interior de la celda con una SINR igual o ligeramente superior a  $-20dB$ , de color azul aquellos usuarios con una SINR requerida de  $-14dB$  y de color rojo aquellos usuarios que quedaron sin servicio al no alcanzar la SINR objetivo. Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron con 1000 iteraciones del algoritmo definido de acuerdo al modelo de juego establecido.

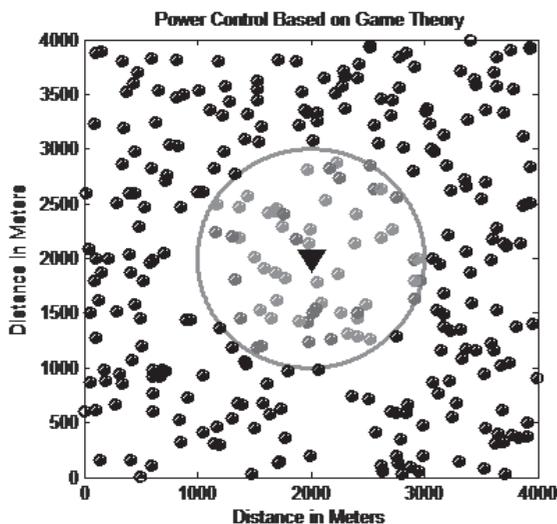
Para establecer un punto de comparación se aplicó de manera simultánea al escenario un Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*), en el cual la potencia para cada usuario se determina mediante la solución de un sistema de ecuaciones lineales [20], [21], adaptándolo al escenario de análisis [22].

#### 3.1 PRIMER CASO

Para esta prueba se configuró como SINR requerida para los UE al interior de la celda un valor de  $-20dB$ . En la figura 1 se muestra el resultado de una simulación en la cual se observa que las condiciones aleatorias del canal generan coberturas irregulares. La estación base

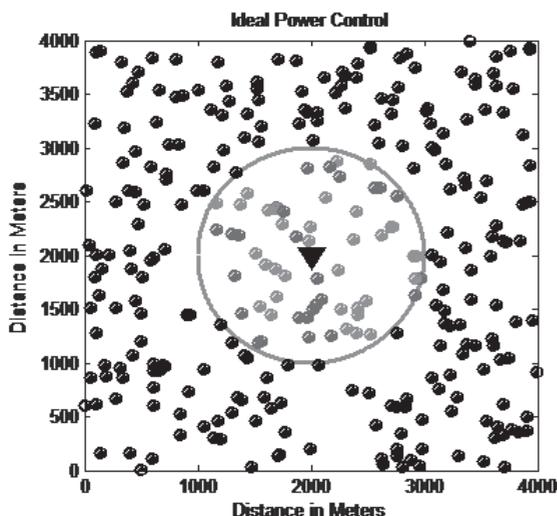
mantiene 38 UE de los 60, que se encuentran al interior de la celda, que corresponde a un 63% de los usuarios al interior de la celda.

**FIGURA 1.** Resultado modelo basado en GT



En la figura 2, se muestran los resultados obtenidos con el IPC, donde son atendidos 34 UE, un valor aproximado al obtenido con la aplicación del modelo basado en Teoría de Juegos (GT), que corresponde con un 56.67% de los usuarios al interior de la celda.

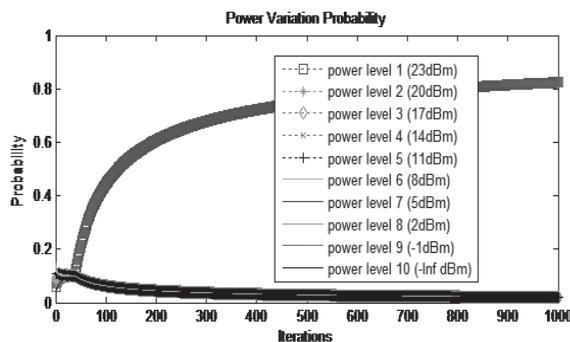
**FIGURA 2.** Resultado con IPC



La figura 3, correspondiente a un usuario ubicado a 687m de la BS, muestra la variación de la probabilidad para la selección de la estrategia o potencia de transmisión,

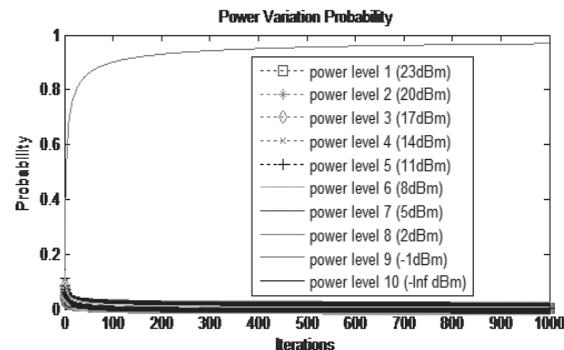
donde a la distancia a la que se encuentra solo es posible utilizar la potencia de transmisión más alta. Se puede ver como en las primeras iteraciones el UE tiene una variación de probabilidad de potencias hasta que determina cual es la potencia necesaria para transmitir, que para este caso es 23dBm.

**FIGURA 3.** Probabilidad de potencias usuario a 687m



En la figura 4 se observa la variación de probabilidad para un UE que se encuentra a una distancia de 142.6m de la BS. Se nota que este usuario no necesitó de muchas iteraciones para determinar la potencia de transmisión adecuada, y en comparación con el anterior UE, la potencia seleccionada es menor (-1dBm), procurando minimizar el efecto de interferencia sobre el sistema.

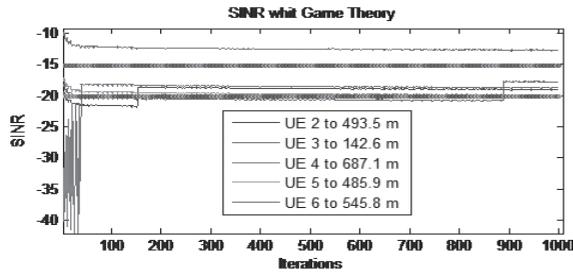
**FIGURA 4.** Probabilidad potencias usuario a 142.6



La figura 5, muestra como varía la SINR para algunos usuarios durante las 1000 iteraciones. Se observa como en las primeras iteraciones existe una variación grande de la SINR y posteriormente se estabiliza sobre valores cercanos al valor objetivo de -20dB.

Los valores correspondientes al usuario 3, se deben a que dicho usuario, pese a la aplicación del modelo, supera el rango máximo de la SINR objetivo debido a que por su cercanía a la BS utiliza la menor potencia posible, causando un valor elevado de interferencia.

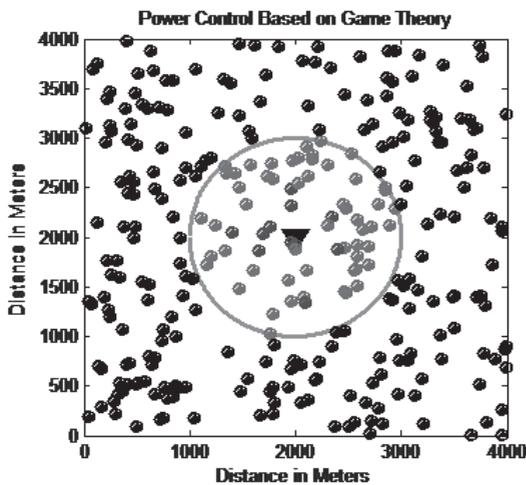
**FIGURA 5.** SINR para primer caso con SINR



**3.2 SEGUNDO CASO**

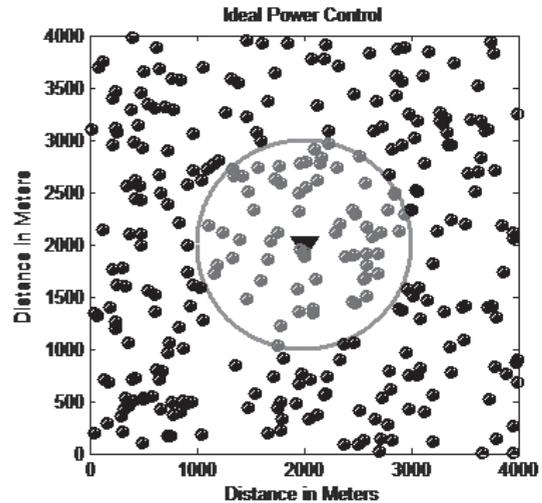
En este segundo caso los UE incluidos en el escenario tienen un requerimiento de SINR de  $-14\text{ dB}$ . En la figura 6, se muestra el resultado del cambio de la SINR objetivo. Se observa que la cobertura del sistema se redujo, atendiendo a 11 UE de un total de 66, lo cual constituye un 16.67% de los UE al interior de la celda.

**FIGURA 6.** Resultados modelo basado en GT



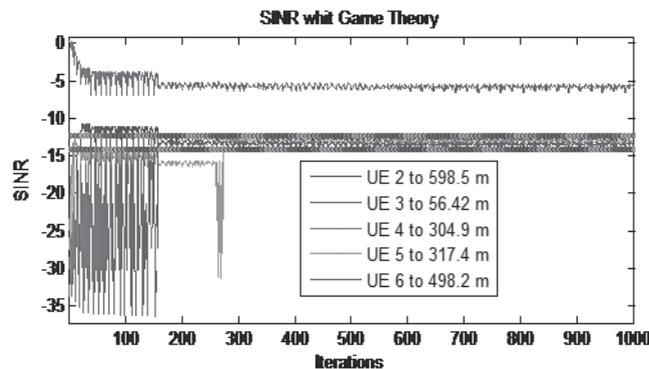
En la figura 7, se puede ver que cuando la BS aplicó el IPC no fue posible mantener el servicio a ningún usuario, debido a que el nivel de interferencia es elevado y además porque el cálculo utilizado en el IPC, conlleva a potencias que no se ajustan al rango permitido en el UE y esto genera un desajuste en la configuración del sistema.

**FIGURA 7.** Resultado con IPC

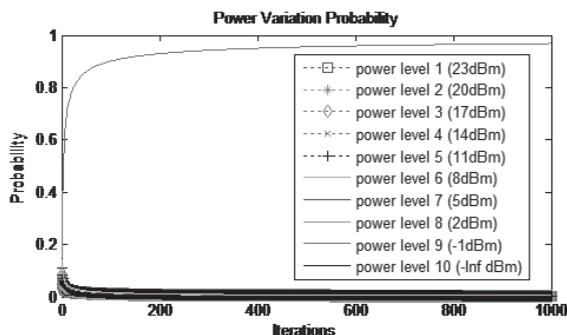


La figura 8, muestra que el valor de la SINR tiene mayores fluctuaciones que las obtenidas en el caso anterior, además se puede notar que existe un UE con una SINR superior a la permitida, esto se debe a que el usuario llegó al mínimo valor de potencia permitido como se muestra en la figura 9, que corresponde a  $-1\text{ dBm}$  y por lo tanto genera una interferencia inadecuada, pero dado al reducido rango de potencia establecido para los UE, no es posible ofrecer otra solución por parte del sistema.

**FIGURA 8.** SINR para segundo caso



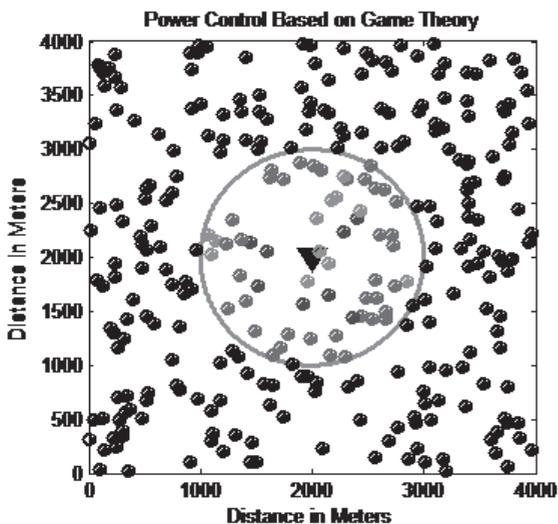
**FIGURA 9.** Probabilidad de potencias usuario 3



**3.3 TERCER CASO**

Para analizar el impacto de incluir un valor de SINR superior, se incluyó en el escenario usuarios con los dos valores de SINR objetivo. En este caso, como lo muestra la figura 10, el sistema atiende 20 UE de un total de 57 UE, que corresponde a un 35% del total de UE.

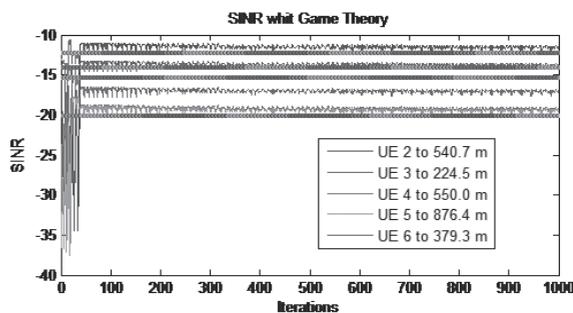
**FIGURA 10.** Resultados GT para tercer caso



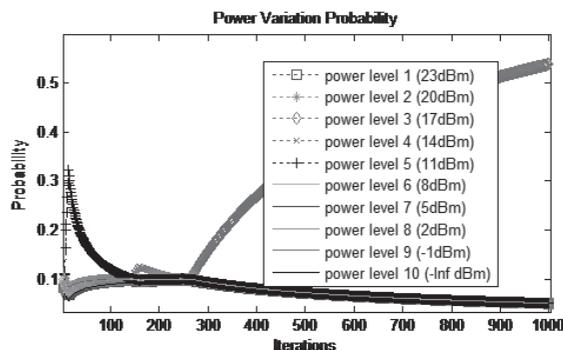
Al igual que en el caso anterior con la aplicación del IPC, no se pudo asegurar la SINR requerida para ningún usuario.

En las figuras 11 y 12, se observa como el sistema mantiene la SINR con las variaciones de probabilidad correspondientes, incrementando la potencia de transmisión de acuerdo a dicha variación. Se puede notar en la figura 12, como varía la probabilidad para los niveles de potencia de UE y por consiguiente el usuario cambiará de potencia para mantener la calidad de su servicio.

**FIGURA 11.** SINR para tercer caso



**FIGURA 12.** Probabilidad para usuario 6



**4. RESUMEN**

La tabla 1 muestra el resumen de los resultados de la capacidad obtenida al aplicar el modelo de GT, se puede notar como en todos los casos la capacidad obtenida fue superior a la obtenida con la aplicación de IPC, incluso con el incremento de los requerimientos de los usuarios el modelo basado en GT permite que el sistema proporcione servicio a algunos UE.

**TABLA 1.** Resumen de capacidad

	Capacidad					
	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
GT	38UE	63%	11UE	16.67%	20UE	35%
IPC	34UE	56.67%	0UE	0%	0UE	0%

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la Teoría de Juegos (GT) es una herramienta muy importante para aquellos problemas de asignación de recursos donde se requiera obtener un beneficio común sin necesidad de forzar la colaboración de los UE. Sin embargo para que el modelo de juego brinde buenos resultados es necesario seleccionar el tipo de equilibrio adecuado, que se ajuste a las características del sistema.

La adaptación y aplicación de un equilibrio de satisfacción permite que el sistema satisfaga los requerimientos de más usuarios, al no exceder el límite del beneficio establecido, obteniendo una colaboración implícita entre usuarios.

El controlar adecuadamente la potencia le proporciona un ahorro de energía al sistema de tal manera que puede atender una mayor cantidad de usuarios, para los usuarios el beneficio se refleja en una mayor autonomía de los dispositivos móviles y la vida útil de sus baterías.

La inclusión de Aprendizaje Reforzado agiliza la obtención de una solución en el problema planteado, haciéndose evidente en los cambios de probabilidad asociada a una potencia de transmisión.

Los resultados obtenidos evidencian que la teoría de juegos se puede aplicar a sistemas que tengan una cantidad de usuarios elevada, permitiendo mejorar el comportamiento de dichos sistemas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Cauca, por su apoyo para la realización de este trabajo, en especial a los grupos de investigación GRIAL y GNTT.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Kwak, K. & Mehta, S. (2010). Convergence and Hybrid Information Technologies: Application of Game Theory to Wireless Networks. *INTECH*, pp. 361 – 376.
- [2] Goodman, D. & Mandayam, M. (2000). Power control for wireless data. *IEEE Personal Communications*, vol. 7, No. 2, pp. 48-54.
- [3] Debbah, M; Perlaza, S. & Rose, L. (2001). On the Nash Equilibria in Decentralized Parallel Interference Channels. *ICCC*, abs/1106.2650, Kyoto.
- [4] Perlaza, S.M. et al. (2010). Satisfaction Equilibrium: A General Framework for QoS Provisioning in Self-Configuring Networks, *GLOBECOM*, pp.1-5.
- [5] Chandramouli, R. & Xing, Y. (2008). Stochastic Learning Solution for Distributed Discrete Power Control Game in Wireless Data Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 4, pp. 932 - 944.
- [6] Jungers, M. Lasaulce, S. & Tembine, H. (2010). Joint power control-allocation for green cognitive wireless networks using mean field theory. *Centre National de la Recherche Scientifique*.
- [7] Canales, M.; Ciria, R. & Gallego, J. R. (2011). Distributed channel allocation and power control in cognitive radio networks using game theory," *IEEE 74th Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC2011-fall)*, San Francisco (EE.UU.).
- [8] Park, J. et al. (2010). A game theoretic power control algorithm with subchannel nulling for wireless networks. *IEEE Trans. Commun.*, vol. E93-B, No 6, pp. 1649-1652.
- [9] Godlewski, P.; Lagrange, X. & Nuaymi, L. (2002). A power control algorithm for 3G WCDMA System. *In Proceedings of European Wireless*, Florence, Italy.
- [10] Rahman, M. et al. (2007). Radio resource management in 3G UMTS networks. M.S. thesis, Department of Signal Processing, Blekinge Institute of Technology, pp. 52-59.
- [11] Mandayam, N.; Goodman, D. & Saraydar, C. (2002). Efficient Power Control via Pricing in Wireless Data Networks. *Lucent Technol. Bell Labs, Holmdel, NJ, IEEE communication magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 91 - 303.
- [12] Lasaulce, S. & Tembiné, H. (2011). *Game Theory and Learning for Wireless Networks: Fundamentals and Applications*. Kindlington, Oxford: Academic Press.
- [13] Myerson, R.(1991). *Game Theory: Analysis of Conflict*. London, England: Harvard University Press.
- [14] Morgenstern, O. & Neumann, J. (1953). Theory of Games and Economic Behavior. *Princeton University Press*, 1953, pp.1-20.
- [15] Nash J. (1950). Non-Cooperative Games. Presented to Faculty of Princeton University in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy.
- [16] Osbrne, M. (2002). Nash equilibrium: theory, Draft chapter from an introduction to game theory, pp. 11-52.
- [17] Chaib-draa, B. & Ross, S. (2005). Report on Satisfaction Equilibria. Department of Computer Science and Software Engineering, Laval University, Québec, Canada.
- [18] Debreu, G. (1952). A social equilibrium existence theorem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , Vol. 38, No. 10, pp. 886-893.
- [19] Bennis, M. & Perlaza, S. (2011). Decentralized Cross-Tier Interference Mitigation in Cognitive Femtocell Networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-5.

- [20] Mendo, L. (2001). Capacidad en sistemas celulares W-CDM. Tesis Doctoral, Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid.
- [21] Quintero, V. (2010). Evaluación del desempeño de sistemas de comunicación móvil celular de tercera generación – WCDMA. Tesis de Maestría no publicada. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca.
- [22] Miramá V. F. & Quintero, V. M. (2014). Control Ideal de Potencia en Sistemas de Comunicaciones Limitados por Interferencia. *Segundo Taller Latinoamericano de Instrumentación, Control y Telecomunicaciones - SICOTEL 2014*. (pp. 173-181, 2014). Armenia, Quindío, Colombia. ISBN: 978-958-8593-44-9.