

# Un algoritmo de control de potencia para WLAN basado en Teoría de Juegos<sup>1</sup>

## A power control algorithm for WLAN based on Game Theory

C.E. Caicedo, A. J. Pabón y V. F. Mirama

Recibido: octubre 17 de 2018 – Aceptado: mayo 30 de 2019

**Resumen**— La ubicuidad y el amplio despliegue de redes inalámbricas de área local (WLAN) han aumentado el riesgo inherente de interferencia. En numerosos estudios se ha demostrado que el control de potencia es una alternativa eficiente para hacer frente a esta situación y una técnica sobresaliente para realizar control de potencia es la teoría de juegos (GT). Sin embargo, la investigación en este campo se ha enfocado en desarrollos teóricos y simulación a nivel de sistema dada la complejidad de implementar control de potencia en un entorno real. Este artículo presenta la implementación de un algoritmo de control de potencia basado en teoría de juegos en redes WLAN, específicamente en el estándar IEEE 802.11 a través de plataformas de radio definidas por software (SDR, Software Defined Radio) y hardware reconfigurable. Los resultados demuestran que el algoritmo aumenta significativamente el ahorro de energía y la eficiencia energética de las STA y disminuye la interferencia. Esta reducción de interferencia mejora el rendimiento general de la red, disminuyendo la FER y aumentando la velocidad de datos

**Palabras Claves**—Control de potencia, IEEE 802.11, interferencia, SDR, teoría de juegos, WLAN.

**Abstract**— The ubiquity and wide deployment of wireless local area networks (WLAN) have increased the inherent risk of interference. Numerous studies have shown that power control is an efficient alternative to deal with interference and an outstanding framework for modeling scenarios in which user equipments perform power control is game theory. However, the research in this field has focused on the theoretical analysis and system-level simulations given the complexity of implementing power control in a real environment. This paper shows the implementation of a power control algorithm for WLAN based on game theory (GT), specifically, the IEEE 802.11.a standard using software defined radio (SDR) platforms and reconfigurable hardware. The results show that the algorithm significantly increases the energy savings and energy efficiency of the stations (STA) and decreases the interference. The interference reduction improves the overall network performance, decreasing the FER, and increasing the throughput.

**keywords**— Power Control, IEEE 802.11, Interference, SDR, game Theory, WLAN.

<sup>1</sup>Producto derivado del proyecto de investigación “Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en teoría de juegos en redes WLAN”. Presentado por el Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL), de la Universidad del Cauca.

C. E. Caicedo, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: [camilo.caicedo@unicauca.edu.co](mailto:camilocaicedo@unicauca.edu.co).

J. V. Pabón, Universidad del Cauca, Popayán Colombia, email: [pabonalvaron@unicauca.edu.co](mailto:pabonalvaron@unicauca.edu.co).

V. F. Mirama, Universidad del Cauca, Popayán Colombia, email: [vmirama@unicauca.edu.co](mailto:vmirama@unicauca.edu.co).

**Como citar este artículo:** Caicedo, C. E., Pabón, J. V. y Mirama, V. F. Un algoritmo de control de potencia para WLAN basado en Teoría de Juegos, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 13, no. 25, pp. 77-84, enero-junio 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.4017>.



## I. INTRODUCCION

ACTUALMENTE las redes inalámbricas constituyen una de las áreas de mayor crecimiento en el sector de las telecomunicaciones gracias a ventajas tales como flexibilidad, bajo costo de implementación, interoperabilidad y escalabilidad, en comparación con las tecnologías cableadas. Específicamente WIFI, nombre comercial del estándar IEEE 802.11 es una de las tecnologías encargadas de dar soporte a nuevas implementaciones como el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), 5G y comunicaciones Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*). Sin embargo, debido a que las bandas de frecuencia en que opera WIFI son no licenciadas y tienen un limitado número de canales ortogonales, la ubicuidad y el gran despliegue de este tipo de redes generan problemas críticos de interferencia entre sistemas adyacentes, llevando al desempeño de estos

sistemas muy por debajo de los límites óptimos alcanzables. El despliegue masivo de estas redes, la aparición de nuevos servicios, y el crecimiento del tráfico multimedia requieren el adecuado diseño, planificación, y despliegue de las redes inalámbricas [1].

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos incluyen técnicas de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) dentro de sus procesos de control para lograr un uso eficiente de los recursos de comunicación disponibles en una red. Una de las técnicas más sobresalientes dentro de los mecanismos de RRM es el Control de Potencia de Transmisión (TPC, *Transmission Power Control*) [2]–[4], la cual ha demostrado ser una técnica que permite incrementar la eficiencia energética, aumentar la vida útil de las baterías de los dispositivos inalámbricos, mejorar el desempeño de la red y optimizar la reutilización del número finito de canales, lo que reduce notablemente la interferencia gracias a la asignación del valor de potencia de transmisión acorde a las condiciones del escenario de despliegue y de las características de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*).

Una técnica que se ha demostrado beneficiosa para realizar control de potencia es la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*) [5]. La GT es una herramienta muy eficaz para modelar escenarios en los cuales los participantes interactúan por acceder a un determinado recurso o beneficio [6]. Investigaciones previas se han enfocado en el análisis teórico complementado con simulaciones a nivel de sistema de algoritmos de control de potencia basados en GT, obteniendo resultados muy sobresalientes. Existen limitados trabajos que implementan de manera práctica en escenario reales mecanismos de control de potencia y lo hacen sin aplicar GT. El limitado número de implementaciones prácticas en Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Area Network*) reales se debe a la complejidad que éstas presentan debido a la necesidad de realizar modificaciones en el nivel de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) como la introducción de un nuevo tipo de trama o la adición de información a la trama Beacon [7]. De esta forma, el objetivo de esta investigación se enfoca en validar los resultados obtenidos en [8], por medio de la implementación de un algoritmo de control de potencia en un entorno WLAN real basado en GT mediante Radio Definida por Software (SDR, *Software Defined Radio*) y hardware reconfigurable.

Se seleccionó y adaptó el algoritmo de control de potencia basado en GT utilizado en [8], ya que es un algoritmo genérico que utiliza parámetros medibles, incluye la técnica de Aprendizaje Reforzado (RL, *Reinforcement Learning*) [9] y propone como solución el Equilibrio de Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*) [10]. Al controlar la potencia de transmisión, el algoritmo permite que la Estación (STA, *Station*) ahorre hasta un 99,53 % de la energía en escenarios específicos, de esta forma se aumenta notablemente la eficiencia energética de cada STA prolongando la duración de las baterías. Además, permite

reducir la interferencia y, por ende, minimiza la cantidad de tramas perdidas o erradas, mejorando el desempeño de la red.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección II se presentan los trabajos relacionados; en la sección III se encuentran el modelo del sistema, donde se describen el juego y el algoritmo utilizados y se realiza una descripción de las consideraciones de diseño e implementación; la sección IV presenta el análisis de resultados de la implementación y finalmente la sección V presenta las conclusiones del trabajo.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

Diferentes mecanismos de TPC se han propuesto para controlar la interferencia y mejorar el desempeño de redes IEEE 802.11. En [11] y [12] se presentan algoritmos de control de potencia con GT diseñados específicamente para redes IEEE 802.11 que intentan maximizar no solo la velocidad de transmisión de datos de usuario sino la velocidad de transmisión de datos promedio del sistema. El sistema de comunicación en [13], se modela como un juego cooperativo, sin embargo, en la mayoría de las investigaciones, los sistemas de comunicación se modelan como juegos no cooperativos debido a la complejidad de implementación de algoritmos de control de potencia basados en juegos cooperativos, ya que en este tipo de juegos se requiere la transferencia de la función de utilidad e información adicional entre los diferentes participantes en el sistema de comunicación.

GT permite la óptima asignación de recursos y para ello se busca optimizar una función de utilidad, la cual se define con base en parámetros conocidos de la red inalámbrica tales como la Relación de Entrega de Paquetes (PDR, *Packet Delivery Rate*) [11], la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) [13], [14] y el *throughput* [15]. En cada caso, los resultados son favorables y brindan ventajas en comparación a los casos sin control de potencia. Las soluciones del juego planteadas en las investigaciones pueden ser diferentes, en [11] se propone como solución la eficiencia de Pareto, en [16] se hace uso del equilibrio de Nash, sin embargo, en algunas de ellas se concluye que estos conceptos pueden conllevar a resultados ineficientes. Por lo tanto se plantea como solución, la inclusión de SE [12] y el mecanismo de fijación de precios [14].

Otras investigaciones presentan la implementación de mecanismos de control de potencia en entornos reales, sin embargo, no hacen uso de GT, por ejemplo, en [17] se implementa un algoritmo iterativo de control de potencia basado en la SINR para las STA asociadas a un Punto de Acceso (AP, *Access Point*), por medio de una reconfiguración del firmware de los dispositivos de red WLAN. En [18] se utiliza una aplicación de linux llamada Wireless Tools para configurar el controlador de las tarjetas inalámbricas de los dispositivos e implementar un algoritmo que utiliza el Indicador de Intensidad de Señal

Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) como parámetro de control. En [7] se implementa un algoritmo denominado *Minstrel Piano*, el cual permite controlar la potencia y la velocidad de transmisión de datos de manera conjunta por medio de una interfaz de comunicación entre el nivel Físico (PHY, *Physical*) y el nivel MAC utilizando OpenWrt.

### III. MODELO DEL SISTEMA.

La topología utilizada fue una WLAN en modo infraestructura, conformada por dos STA y un AP, las STA operan en la misma frecuencia y transmiten la información en tiempos diferentes. Generalmente, las STA en las WLAN utilizan baterías para su funcionamiento, por esta razón, se realiza el control de potencia en el Enlace Ascendente (UL, *Up-Link*) para incrementar la eficiencia energética, prolongar la duración de las baterías y disminuir el nivel de interferencia entre las STA al limitar su potencia de transmisión a niveles óptimos. Además, el algoritmo de control de potencia es de lazo cerrado, por lo tanto, el AP realimenta a las STA por medio de parámetros de control, en las STA se extrae esa información y se ejecuta el algoritmo, en el cual cada STA puede elegir entre 15 niveles discretos de potencia en el rango de -3,32 dBm a 19,99 dBm.

#### A. Modelo del juego y descripción del algoritmo.

Un juego se define por cuatro elementos, el primero de ellos representa los jugadores, el segundo corresponde al conjunto de estrategias que puede elegir cada jugador, el tercero representa el conjunto de los beneficios obtenidos por cada jugador, asociados a la estrategia seleccionada y finalmente la función de satisfacción de los jugadores. Por tanto, para este artículo el modelo de juego es definido por  $G = (N, \{P_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}, \{f_n\}_{n \in N})$ , donde  $N$  representa al conjunto de STA,  $P_n$  es la estrategia seleccionada por cada STA, correspondiente al conjunto de potencias de transmisión que puede utilizar,  $u_n$  es la SNR alcanzada por la STA al aplicar una potencia de transmisión  $p_n \in P_n$ , y  $f_n$  es la función de satisfacción impuesta para cada STA presente en la red, la cual se define en (1).

$$f_n = (p_n \in P_n : \gamma_n + \beta \geq u_n(p_n) \geq \gamma_n) \quad (1)$$

De la ecuación (1) se observa que un jugador es satisfecho u obtiene una recompensa si la utilidad obtenida está dentro del rango con límite inferior  $\gamma_n$ , correspondiente a la SNR mínima requerida por cada STA y con un límite superior que se impone para que un usuario cause la menor interferencia posible a los demás usuarios.  $\beta$  depende de la tolerancia del sistema a interferencia.

Para todo instante de tiempo  $t$  existe un vector de probabilidades  $\pi_n(t) = \{\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_k(t)\}$ . Cada elemento de este vector se relaciona uno a uno con los

elementos del vector  $P_n$  encargado de almacenar los valores discretos de potencia para la STA<sub>n</sub>. Los valores iniciales del vector de probabilidades se eligen de manera aleatoria, con la condición de que la suma total de estos valores sea igual a 1.

En el instante  $t = 0$ , la STA selecciona una potencia de transmisión inicial  $p_n \in P_n$  asociada al elemento de mayor probabilidad de  $\pi_n(t)$ .

Para todo  $t > 0$ , el AP calcula la utilidad alcanzada por cada STA que en este caso corresponde a la SNR y envía esta información a la STA para que actualice el vector de probabilidades. Cada STA realiza el cálculo de  $b_{n,t}$ , el cual está definido en (3).

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

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

Una vez obtenido el valor de  $b_{n,t}$ , se actualiza el vector de probabilidades de acuerdo con los criterios de (4).

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

Las funciones  $g'(\pi_n(t-1))$  y  $g(\pi_n(t-1))$  se definen en (4) y (5), respectivamente.

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

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

Donde  $n_{tot}$  corresponde al número total de estrategias y  $\lambda_{n,t} = 1/(1+0,1t)$  es la tasa de aprendizaje para cada STA. A diferencia de los algoritmos implementados en [8], [19] y [20], la tasa de aprendizaje debe ser reinicializada en determinados periodos de tiempo, para garantizar que las STA adapten rápidamente su potencia de transmisión en condiciones de movilidad. El comportamiento del juego es no cooperativo ya que se realiza de manera independiente para cada STA, sin tener en cuenta la utilidad de las demás.

#### B. Descripción de la Implementación

La tecnología SDR fue seleccionada para implementar el algoritmo en dispositivos que implementan el estándar IEEE 802.11, utilizando GNU Radio como plataforma de desarrollo. Respecto al hardware, se seleccionaron los USRP B210 para que emulen las funciones de las STA y el AP.

Se utilizó como sistema de comunicación base, el

sistema de comunicación IEEE 802.11a/g/p desarrollado en [21], el cual es código abierto, soporta diferentes esquemas de modulación y codificación, implementa distintos algoritmos de estimación de canal, sin embargo no implementa una técnica de acceso al medio debido a que el método de acceso del estándar IEEE 802.11 considera tiempos en el orden de los microsegundos y en la implementación SDR es posible alcanzar tiempos en el orden de los milisegundos.

Existe información limitada en la hoja de datos del fabricante [22] acerca de la potencia de salida del USRP B210, por lo tanto, se hizo una caracterización de la potencia de transmisión por medio de un analizador vectorial de redes con su sensor de potencia NRP-Z22. Para la asignación dinámica de la potencia de transmisión.

Debido a que el algoritmo de control de potencia es de lazo cerrado, se implementó una comunicación bidireccional y se incluyeron modificaciones específicas en la configuración del AP para que éste calcule la SNR de la comunicación de cada STA y posteriormente envíe este valor de retorno hacia las STA utilizando los primeros 2 bytes del campo de datos de la trama MAC, en las STA se extrae esa información y se ejecuta el algoritmo. Para la asignación de la potencia de transmisión seleccionada por el algoritmo fue necesario modificar el controlador del USRP que incluye GNU Radio. Además, en el AP y en la STA se incluyen algoritmos de verificación de las direcciones MAC para que la información llegue al destino correcto.

#### IV. EXPERIMENTACIÓN

El análisis del algoritmo se centra en su comportamiento con respecto a la convergencia, la eficiencia energética, interferencia, Tasa de Error de Tramas (FER, *Frame Error Rate*) y el throughput en la red WLAN, en consecuencia, la incidencia del algoritmo se evalúa por medio de la comparación entre casos con control de potencia y casos sin control de potencia en escenarios de interiores y exteriores como se muestra en la Fig. 1.

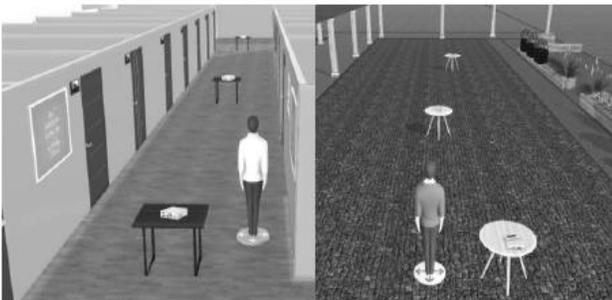


Fig. 1. Escenarios de Pruebas.

##### A. Análisis de convergencia del algoritmo.

El algoritmo implementado en [8], no considera movilidad de los usuarios, por esta razón, la ecuación que describe la tasa de aprendizaje reforzado de los usuarios, por esta

razón, la ecuación que describe la tasa de aprendizaje reforzado permite la convergencia del algoritmo a valores de probabilidad muy cercanos a 1, sin embargo, éste aprendizaje obtenido después de varias iteraciones del algoritmo no permite a las STA adaptarse rápidamente a las condiciones variables del escenario inalámbrico, generadas por la movilidad. Como solución a esta situación, se propuso realizar una reinicialización periódica de la tasa de aprendizaje del algoritmo. En la Fig. 2 se presenta la gráfica de probabilidad de las estrategias vs número de iteraciones del algoritmo para una STA cuando no se aplica reinicialización de la tasa de aprendizaje, en la cual se observa que la STA seleccionó inicialmente la estrategia 4 de potencia de transmisión, luego, en la iteración 400 la STA se alejó 7 m del AP y el algoritmo tardó 500 iteraciones en elegir una nueva estrategia para mantener la SNR objetivo.

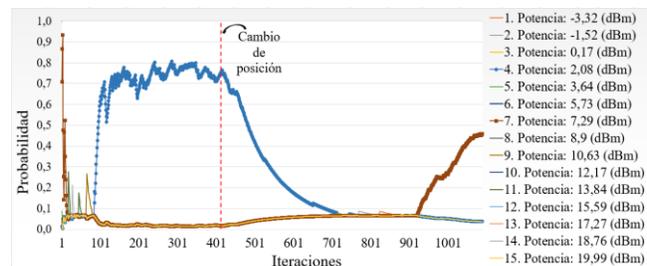


Fig. 2. Variación de la probabilidad de potencia sin reinicio de la tasa de aprendizaje.

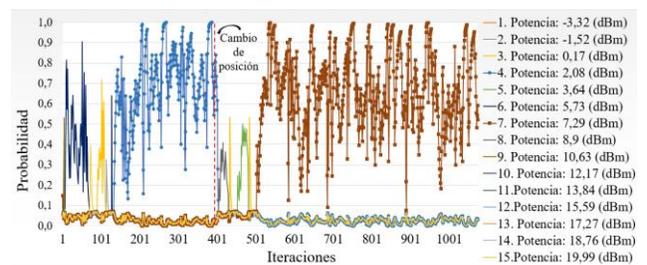


Fig. 3. Variación de la probabilidad de potencia con reinicio de la tasa de aprendizaje.

En la Fig. 3 se presenta la misma prueba, esta vez aplicando la reinicialización de la tasa de aprendizaje y como se observa la STA configuro inicialmente la estrategia 4 como potencia de transmisión y después del movimiento de la STA, solo tardó 100 iteraciones para que el algoritmo seleccione una estrategia diferente. A pesar de que la reinicialización de la tasa de aprendizaje hace que la probabilidad de la estrategia seleccionada varíe y que el algoritmo no converja totalmente a valores cercanos a 1, facilita la adaptación de la STA a nuevas condiciones del escenario, cambiando y eligiendo rápidamente una mejor estrategia.

Para la siguiente prueba, la STA se ubicó a 5 m del AP y como se observa en la Fig. 4, la STA inició transmitiendo con una potencia de 0,17dBm, correspondiente a la estrategia 3 del perfil de estrategias, sin embargo, en la Fig. 5 se aprecia que la utilidad obtenida oscila fuera de los

límites de satisfacción, por lo que el algoritmo realizó una actualización de las probabilidades y por esta razón, la probabilidad de la potencia seleccionada inicialmente disminuyó a medida que aumentó la probabilidad de las demás estrategias. El algoritmo probó varias potencias hasta la iteración 110 aproximadamente, momento en el cual, seleccionó la potencia de transmisión de 2,08 dBm, con la que obtuvo una utilidad dentro del rango establecido, tal como se observa en la Fig. 5. La Fig. 6 muestra la variación de probabilidades para la misma STA a una distancia de 20m y, se observa que la STA eligió finalmente la potencia de transmisión de 13,84 dBm. Estos resultados evidencian que, a distancias largas entre la STA y el AP, el algoritmo elige una potencia de transmisión altas para obtener valores de SNR dentro del rango de satisfacción y a distancias cortas la STA utiliza potencias bajas, evitando el consumo innecesario de energía de las STA.

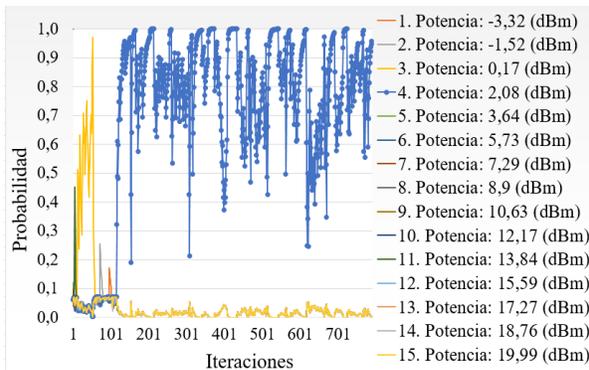


Fig. 4. Variación de la probabilidad de potencia para STA a 5 m del AP.

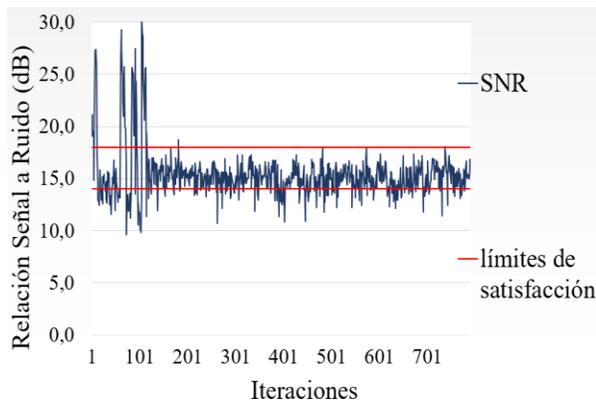


Fig. 5. Variación de la SNR para STA a 5 m del AP.

Con el objetivo de evidenciar el cambio dinámico de la potencia de transmisión, se ubicó inicialmente la STA a 4 m del AP y cada 200 iteraciones se aleja 4 m más, hasta llegar a una distancia de 20m. En la Fig. 7 se observa que el algoritmo logra configurar las potencias de transmisión de 0,17 dBm, 3,64 dBm, 8,9 dBm, 12,17 dBm y 15,59 dBm para las distancias de 4m, 8m, 12m, 16m y 20m, respectivamente, lo que evidencia que el algoritmo elige la potencia de transmisión dependiendo de la distancia, además, el cambio estrategia es rápido, pues en pocas

iteraciones, la STA selecciona una nueva estrategia para obtener el mejor beneficio.

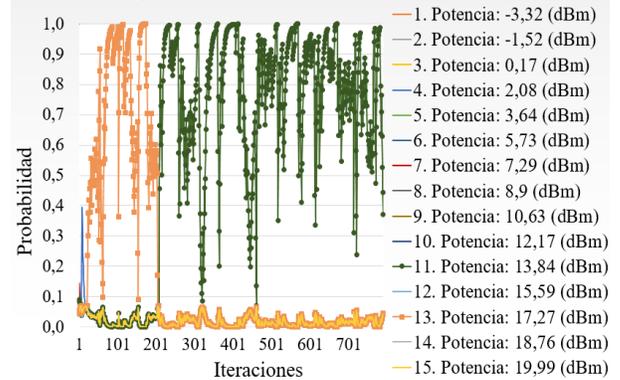


Fig. 6. Variación de la probabilidad de potencia para STA a 20 m del AP.

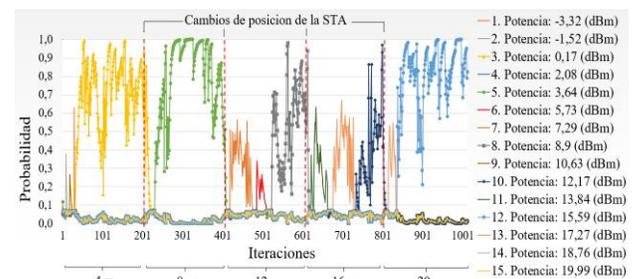


Fig. 7. Variación de la probabilidad de potencia para STA con movilidad.

## B. Análisis de Potencia de Transmisión

Para realizar esta prueba se ubicó la STA 1 a diferentes distancias del AP, mientras la STA 2 se mantuvo estática a una distancia de 10 metros del AP. Se tomaron datos con el algoritmo de control de potencia activado y luego desactivado, para un escenario exterior y un escenario interior con una frecuencia de operación de 5,805 GHz. La Fig. 8, muestra la variación de la potencia de transmisión con respecto a la distancia que existe entre el AP y la STA y la Fig. 9, muestra un cálculo porcentual del ahorro de energía de la STA.

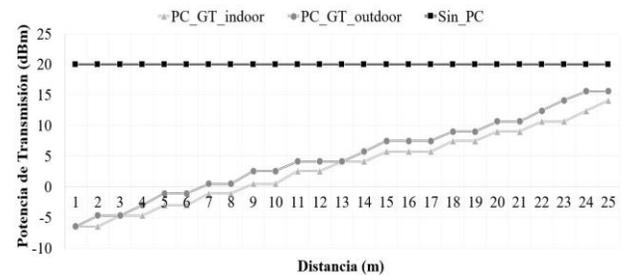


Fig. 8. Comparación de la potencia de transmisión para escenarios sin control de potencia y con control de potencia en escenarios interiores y exteriores.

La Fig. 8 muestra que con control de potencia y para todas las distancias, la STA selecciona potencias de transmisión menores en comparación con la STA sin control de potencia, esto genera un ahorro significativo de energía para todas las distancias, especialmente para distancias cortas. La distancia máxima alcanzada, a la cual

el algoritmo funcionó satisfactoriamente fue 25 m, distancia a la cual según la Fig. 9 el ahorro fue de 46,54% y 24,66% para los escenarios de interiores y exteriores, respectivamente, y para la distancia mínima en los dos escenarios el ahorro fue de 99,53%. Se observa que el ahorro de energía en interiores es mayor que en exteriores, esto se debe a que en el primero hay menos dispersión de las señales y algunas de ellas llegan al receptor por efecto del multitrayecto.

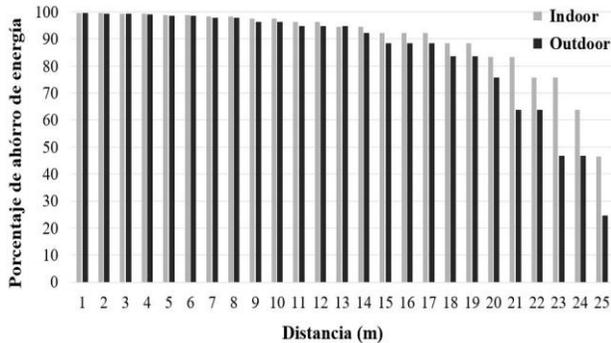


Fig. 9. Ahorro de energía con control de potencia en escenarios interiores y exteriores.

### C. Análisis de FER

En esta prueba las STA fueron ubicadas a distancias de 5 m, 10 m y 15 m respecto al AP y se tomaron datos de la FER en el enlace ascendente con el algoritmo de control de potencia activado y desactivado. Para cada distancia y cada STA, se calculó la FER respecto a 1000 tramas enviadas y se realizó la misma prueba 5 veces para obtener 5 valores de FER a una misma distancia y poder realizar el promedio estadístico. Como se observa en la Fig. 10, cuando las STA utilizan el algoritmo de control de potencia, la FER experimenta una disminución, este comportamiento es más evidente a distancias cortas, debido a que una STA sin el algoritmo de TPC, utiliza un nivel de potencia de transmisión alto y genera gran interferencia, pues su zona de cobertura es mucho mayor que el área de cobertura de una STA que utiliza el algoritmo de control de potencia y zonas de cobertura más grandes implican solapamiento de las mismas y por lo tanto mayor interferencia. El algoritmo de TPC permite reducir la potencia a un nivel adecuado, con el cual las dos STA alcanzan valores de SNR dentro de los límites de satisfacción y de esta manera, reducen la zona de cobertura, disminuyen la interferencia y, por ende, la cantidad de tramas perdidas.

A distancias mayores el algoritmo elige potencias altas, cercanas a la potencia de transmisión que utilizan las STA sin el algoritmo de TPC, en esta situación, las señales enviadas por una STA se atenúan en mayor proporción y por lo tanto el nivel de las señales interferentes será menor. En este caso el algoritmo de control de potencia no tiene la posibilidad de disminuir en gran medida la interferencia y por esta razón, los valores de FER son similares para las dos STA. Se evidenció que la mayoría de las tramas perdidas ocurrieron en la etapa previa a la estabilización del algoritmo en la estrategia adecuada, pues en esta etapa, la STA prueba diferentes estrategias hasta lograr estabilizar su

SNR dentro del rango de satisfacción, algunas de estas estrategias producen SNR muy bajas impidiendo la correcta identificación del símbolo transmitido. Este es el caso de la FER obtenida por la STA 2 en la prueba 2, en la cual se obtuvo un valor muy grande en comparación con los obtenidos en pruebas similares, lo que hace que el promedio aumente, sin embargo, este es un caso muy particular y no ocurre con mucha frecuencia. Esto evidencia que el control de potencia incide positivamente el desempeño de la red.

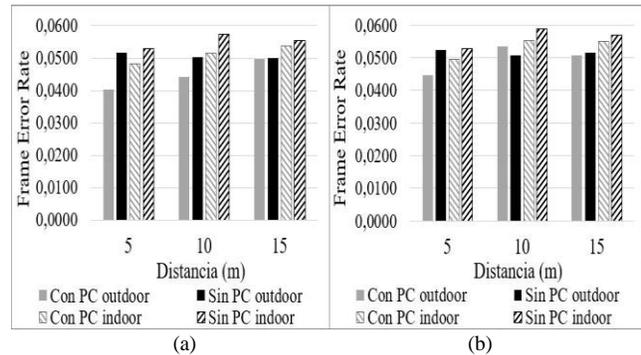


Fig. 10. Comparación de la FER obtenida en escenario con control de potencia y sin control de potencia para: (a) la STA 1 y (b) la STA 2.

### D. Análisis de throughput

Considerando que la cantidad de tramas perdidas por cada STA afecta la velocidad de transmisión real de las STA, es posible relacionar el *throughput* logrado por cada STA. Las ecuaciones (7) y (8) presentan la relación de estos parámetros.

$$BER = 1 - (1 - FER)^{\frac{1}{N}} \quad (7)$$

$$Throughput = R(1 - FER) \quad (8)$$

En la ecuación (7) N representa el número de bits por trama, en (8) R representa la velocidad de transmisión para un Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) específico, en este caso se emplea el MCS 0, el cual utiliza modulación BPSK con una tasa de codificación de 1/2. Los cálculos de *throughput* se hicieron considerando la máxima velocidad de transmisión del MCS 0 la cual es 6 Mbps, a fin de hacer una proyección del *throughput* real que podría obtenerse en una red WLAN que implemente el algoritmo de control de potencia. En la presente implementación esta velocidad no puede ser alcanzada debido a las limitaciones respecto al tiempo de procesamiento de las señales a nivel de software. La Fig. 11 presenta el *throughput* para la STA 1 y la STA 2 generadas a partir de (7) y (8) y de los resultados de FER obtenidos. Se observa que el *throughput* de las STA incrementa al incluir el algoritmo de control de potencia basado en GT y la mejora es más significativa cuando las STA están cerca del AP, esto se debe a que la FER disminuye ya que al utilizar niveles de potencia más bajos con el objetivo de alcanzar una SNR dentro de un rango de satisfacción

establecido, la interferencia disminuye y esta disminución como se ha visto en la sección IV-C, es más significativa a distancias cortas entre el AP y la STA.

Para la distancia de 10 m, la STA 2 tiene menor *throughput* cuando utiliza el algoritmo de control de potencia, lo cual se debe a la mayor duración de la etapa previa a la estabilización del algoritmo una de las pruebas para la STA 2, explicada en la sección IV-C.

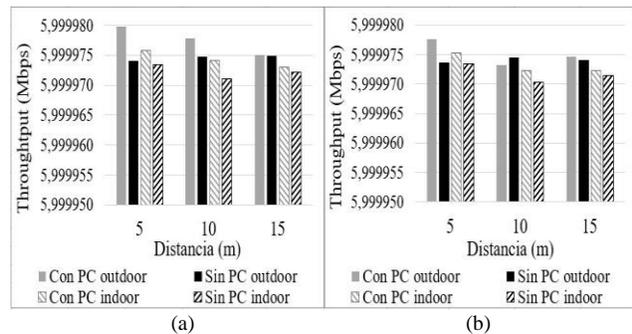


Fig. 11. Comparación del Throughput obtenido en escenario con control de potencia y sin control de potencia para: (a) la STA 1 y (b) la STA 2.

## V. CONCLUSIONES

El algoritmo de control de potencia basado en GT permite configurar dinámicamente la potencia de transmisión de las STA dependiendo de la distancia entre éstas y el AP, los cambios del escenario y la movilidad de las STA. A diferencia de [8], la reinicialización de la tasa de aprendizaje propuesta, permite a las STA la adaptación rápida a las condiciones cambiantes del escenario inalámbrico, logrando ahorros de energía significativos. Además, los resultados obtenidos permitieron deducir que el ahorro de energía es mayor en un escenario de interiores en comparación con un escenario de exteriores y mucho mayor para distancias cortas.

La configuración automática de la potencia para lograr valores de SNR dentro de un rango de satisfacción establecido, minimiza la interferencia entre las STA y por ende la FER, más aún cuando las STA están cerca del AP. De esta manera se logra una cooperación implícita entre STA para mejorar considerablemente el desempeño de la red, aunque las STA sean modeladas como jugadores independientes y el juego sea no cooperativo.

La proyección del *throughput* percibido por las STA, cuando se implementa el algoritmo de TPC es mayor en comparación con el *throughput* obtenido cuando no se utiliza TPC, de esta forma se evidencia que la inclusión del algoritmo incide positivamente en el desempeño de la red.

## REFERENCIAS

[1] Qureshi, A. "Interference diagnosis in wireless systems by using NI USRP," *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 6, p. 10.1-10.10, 2015.

[2] Wang, I., and Chang, L. "Impact of power control on performance of IEEE 802.11 wireless networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 6, no. 11, pp. 1245–1258, 2007.

[3] Chang, C., and Chang, H. "Power control and fairness MAC mechanisms for 802.11 WLANs," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 7, pp. 1527–1537, 2007.

[4] Qiao, D., Choi, S., and Shin, K. G. "Interference analysis and transmit power control in IEEE 802.11a/h wireless LANs," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 15, no. 5, pp. 1007–1020, 2007.

[5] Mackenzie, A. B., and Wicker, S. B. "Game Theory in Communications: Motivation, Explanation, and Application to Power Control," in *GLOBECOM '01*, 2001, pp. 821–826.

[6] Cheng, Z., Zhou, X., Ding, Y., and Miao, X. "A Cooperative Differential Game of Transmission Power Control in Wireless Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 72, no. 4, pp. 2015–2027, 2013.

[7] Huehn, T., and Sengul, C. "Practical power and rate control for WiFi," *21st Int. Conf. Comput. Commun. Networks, ICCCN*, 2012.

[8] Mirama, V., and Quintero, V. "Control de potencia basado en teoría de juegos en sistemas de comunicaciones inalámbricas," *Gerenc. Tecnol. Inform.*, vol. 15, pp. 69–78, 2016.

[9] Romp, G. "Experimental Economics," in *Game Theory Introduction and applications.*, Oxford University Press, 1997, pp. 229–262.

[10] Hamidou, S. L. "A very short tour of Game Theory," in *Game Theory and Learning for Wireless Network, Fundamentals and Applications*, Oxford: Academic Press, 2011, pp. 3–40.

[11] Smith, D. B., Portmann, M., Tan, W. L., and Tushar, W. "Multi-source-destination distributed wireless networks: Pareto-efficient dynamic power control game with rapid convergence," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 6, pp. 2744–2754, 2014.

[12] Hoyos, E., Trujillo, D., and Bermudez, H. "Access point selection in 802.11 Wireless networks ensuring minimum capacity for QoS based on power control," vol. 10, pp. 167–177, 2013.

[13] El-Sabe, Y. M., Esameldin, M., and Ashour, M. "Enhanced Rank Based Cooperative Game (ERBCG) strategy for IEEE 802.11s Mesh WLAN power management," *2013 9th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2013*, pp. 375–380, 2013.

[14] Suman, S. K., Kumar, D., and Bhagyalakshmi, L. "SINR pricing in non-cooperative power control game for wireless ad hoc networks," *KSI Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 8, no. 7, pp. 2281–2301, 2014.

[15] Suman, S. K., Kumar, D., and Bhagyalakshmi, L. "Non cooperative power control game with new pricing for wireless ad hoc networks," *Int. Rev. Comput. Softw.*, vol. 9, no. 1, pp. 18–28, 2014.

[16] Kim, S. "Adaptive online power control scheme based on the evolutionary game theory," *IET Commun.*, vol. 5, no. 18, pp. 2648–2655, 2011.

[17] Michalski, M., and Michalski, K. "A simple performance-boosting algorithm for transmit power control in WLAN access points," *2016 21st Int. Conf. Microwave, Radar Wirel. Commun. MIKON 2016*, pp. 4–7, 2016.

[18] Park, B. H., Kwon, Y. M., Bae, S. J., and Chung, M. Y. "Implementation of connection management scheme of mobile stations in IEEE 802.11 WLAN APs considering transmission power control," *IEEE 2013 Tencon - Spring, TENCON Spring 2013 - Conf. Proc.*, pp. 515–519, 2013.

[19] Cárdenas, M., and Chapid, J. "Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única," 2015.

[20] Cerón, A., and Rosero, D. "Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea," *Universidad del Cauca, Popayán*, 2016.

[21] Bloessl, B., Segata, M., Sommer, C., and Dressler, F. "An IEEE802.11a/g/p OFDM Receiver for GNU Radio," *Proc. 2013 2nd ACM SIGCOMM Work. Softw. Radio Implement. Forum (SRIF)*, pp. 9–15, 2013.

[22] Ettus Research, "USRP B200/B210 Specification Sheet," Ettus Research, 2014. [Online]. Available: [https://www.ettus.com/content/files/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf).



**Camilo Ernesto Caicedo Ramírez** nació en La Cruz, Nariño, Colombia, el 23 de junio de 1995. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2018. Actualmente se desempeña profesionalmente como Ingeniero de soporte y desarrollo en Defytek SAS. Entre sus áreas de interés están: Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica, Comunicaciones Inalámbricas y seguridad en Redes. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4469-4230>.



**Álvaro Javier Pabón Andrade** nació en Tangua, Nariño, Colombia, el 18 de julio de 1993. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2018. Actualmente se desempeña profesionalmente como Ingeniero comisionador en Ingetel SAS. Entre sus áreas de interés están: Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica, Comunicaciones Inalámbricas, Teoría de Juegos e Inteligencia artificial.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1166-4673>.



**Víctor Fabián Mirama Pérez** nació en Pasto, Nariño, Colombia, el 20 de septiembre de 1983. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010. Magister en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013. Docente tiempo completo, Adscrito al Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del

Cauca desde 2009. Miembro del Grupo de Radio e Inalámbricas de la Universidad del Cauca. Entre sus áreas de interés están: Radiocomunicaciones, Sistemas de Comunicación Móviles e Inalámbricos, Gestión de Recursos Radio, Teoría de Juegos y Redes de Próxima Generación.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3845-1985>.