

# Regiones de eficiencia espectral asociadas a satisfacción de QoS basadas en estrategias de ancho de banda

Evelio Astaiza H. <sup>1</sup>, Héctor Fabio Bermúdez O. <sup>2</sup> y Luis Freddy Muñoz <sup>3</sup>

Recepción: 14-04-2016 | Aceptación: 19-10-2016 | En línea: 18-11-2016

MSC:91A80 | PACS:89.20.Ff

doi:10.17230/ingciencia.12.24.7

---

## Resumen

Este artículo presenta los resultados del estudio de la identificación de las regiones de eficiencia espectral que satisfacen los requerimientos de calidad del servicio (QoS) basados en restricciones de ancho de banda en redes basadas en el estándar IEEE 802.11 multicelda. Este problema es abordado desde la perspectiva de la teoría de juegos para la canalización definida en 802.11g, y considerando solamente los canales no traslapados. Para la solución del juego se introducen los conceptos de Equilibrio de Nash (NE), Equilibrio de Satisfacción (ES) y Equilibrio Eficiente de Satisfacción (ESE) proponiendo un algoritmo que permite identificar las regiones de capacidad que satisfacen la QoS requerida por un usuario. Particularmente, en este juego se busca la solución que permita garantizar la tasa de transferencia de información requerida por un usuario en la red minimizando los recursos (ancho de banda) requeridos, permitiendo maximizar la cantidad de usuarios que pueden asociarse a un AP en la red. En el escenario planteado, se verifica que los diferentes equilibrios NE, ES y ESE dependen directamente de las condiciones de ganancia del canal.

---

<sup>1</sup> Universidad del Quindío, [estaiza@uniquindio.edu.co](mailto:estaiza@uniquindio.edu.co), Armenia, Colombia.

<sup>2</sup> Universidad del Quindío, [hfbermudez@uniquindio.edu.co](mailto:hfbermudez@uniquindio.edu.co), Armenia, Colombia.

<sup>3</sup> Fundación Universitaria de Popayán, [lfreddyms@fup.edu.co](mailto:lfreddyms@fup.edu.co), Popayán, Colombia.

**Palabras clave:** Ancho de banda; equilibrio de Nash; equilibrio de satisfacción; equilibrio eficiente de satisfacción; calidad del servicio; teoría de juegos.

---

## Spectral Efficiency Regions Associated to Satisfaction of QoS Based Bandwidth Strategies

---

### Abstract

This paper presents the study results of the identification of the regions of spectral efficiency that satisfy the requirements of quality of service (QoS) based on restrictions of bandwidth based on IEEE 802.11 multicell. This problem is addressed from the perspective of game theory for the channeling defined in 802.11g, and considering only the nonoverlapping channels. To solve the game, the concepts of Nash Equilibrium (NE), Satisfaction Equilibrium (ES) and Efficient Satisfaction Equilibrium (ESE) are introduced, proposing an algorithm to identify regions of capacity that satisfy the QoS required by a user. Particularly, in this game, the solution that allows to guarantee the transfer information rate required by a network user while minimizing the required resources (bandwidth) is sought, allowing users to maximize the amount that can be associated to an AP on the network. In the present scenario, it is verified that the different Equilibrium NE, SE and ESE depend directly on the conditions of channel gain.

**Key words:** Bandwidth; Nash equilibrium; satisfaction equilibrium; efficient satisfaction equilibrium; quality service; game theory.

---

## 1 Introducción

Uno de los problemas a los cuales se enfrentan las tecnologías de acceso inalámbrico es la forma en la cual los terminales de usuario realizan la selección del punto de acceso (AP) al cual se conectan, dado que el mecanismo de asociación utilizado no garantiza satisfacer las necesidades de calidad del servicio (QoS) requeridas por el usuario, generalmente, el mecanismo implementado de asociación de un terminal de usuario a un AP se realiza mediante la selección del AP desde el cual el usuario perciba un mayor nivel de potencia o en su defecto, el AP que se encuentre más cercano [1],[2]; sin embargo, no siempre el AP más cercano o del cual se percibe un mayor nivel de potencia es el adecuado para garantizar QoS desde la perspectiva del ancho de banda disponible que permita garantizar una tasa de transferencia de información requerida para un servicio, esto hace que si

todos los usuarios presentes en un área geográfica, toman la decisión de selección de AP bajo el criterio de mayor potencia recibida o menor distancia, realizarán su conexión a un mismo AP, haciendo que este se congestione y no opere a su capacidad aparente [2], generando situaciones no deseadas como son la reducción del ancho de banda disponible por usuario, incremento de la interferencia, pérdida de paquetes, incremento de los tiempos de retardo y en general degradación de la calidad del servicio (QoS)[1],[3]. De esta forma, la asociación entre usuarios y APs es de gran importancia en el funcionamiento de este tipo de redes, es por ello que un gran número de trabajos se han enfocado en este problema [4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11].

Por lo anterior, identificar las regiones de eficiencia espectral en las cuales se satisface la QoS basado en restricciones de tasa de transferencia de información, es un aspecto relevante que permitirá un mejor aprovechamiento de los recursos radio disponibles, adicionalmente, la formulación de un algoritmo eficiente que permita satisfacer las necesidades de QoS en términos de la mínima capacidad requerida basada en restricciones de ancho de banda, permitirá mejorar los mecanismos actualmente utilizados de selección de AP. Este tipo de problemas es posible abordarlos desde la teoría de juegos [12], la cual permite modelar un escenario en el que los jugadores (usuarios) compiten por obtener unas ganancias (recursos); por lo tanto, la definición y análisis de las regiones de eficiencia espectral en las cuales se satisface la QoS es posible mediante la utilización de los conceptos de equilibrio.

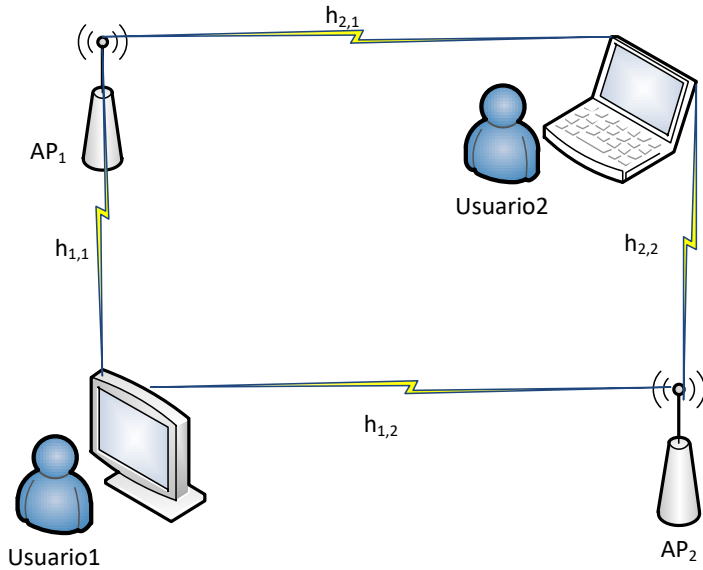
En este artículo, se formula el problema de selección de AP como un juego no cooperativo, estático con información completa; la solución del juego propuesto se realiza desde la perspectiva de los equilibrios de Nash [13], Satisfacción y Eficiente de Satisfacción [14], permitiendo definir las regiones de eficiencia espectral en las cuales se satisfacen los requerimientos de QoS basados en capacidad bajo restricciones de ancho de banda requeridas por el servicio de usuario, formulando un algoritmo eficiente de selección de AP que permite resolver el problema de asociación de un terminal inalámbrico a un AP bajo el criterio de garantizar QoS en el escenario descrito en la sección II.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: En la sección II se

describe el modelo del sistema, luego en la sección III se define la metodología de la solución del juego de selección propuesto y se soluciona el juego, posteriormente en la sección IV se muestran los resultados obtenidos y finalmente en la sección V se plantean las conclusiones del trabajo.

## 2 Modelo del sistema

El escenario considerado se muestra en la Figura 1 donde se representa un modelo de juego basado en la estructura de una red inalámbrica de  $2 \times 2$  (i.e. 2 AP y 2 usuarios), el cual puede ser extensible a un escenario  $n \times n$ , considerando las mismas características del escenario. Para definir el juego, se considera un canal de acceso múltiple (MAC) [15] vectorial sin memoria, que se considera invariante en el tiempo mientras cada jugador selecciona su estrategia.



**Figura 1:** Modelo del juego basado en la estructura de una red inalámbrica

Por facilidad se asume que cada enlace es simétrico y que características del canal y del enlace tales como atenuación asociada a la distancia, desvanecimiento y otros, se encuentran asociados a la ganancia de canal  $g$ , los usuarios en el escenario planteado se conectarán inalámbricamente a cualquiera de los AP disponibles; la selección del AP se realizará de acuerdo a la posibilidad que brinde cada AP de satisfacer las necesidades de tasa de transferencia de información requeridas por cada usuario.

El juego es denotado por (1)

$$G = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n\} \quad (1)$$

Donde  $I = \{1, 2, \dots, i, i + 1, \dots, n\}$  es el conjunto de jugadores (dispositivos de usuario) en la red,  $\beta_i = \{\beta_{i,1}, \beta_{i,2}, \dots, \beta_{i,k}\}$  es el espacio (conjunto) de estrategias ancho de banda asociado a la cantidad de canales  $k$  seleccionados por el jugador  $i$  que equivale a cada una de las posibles estrategias que tiene disponible cada jugador y  $U_i = u_i(\beta_{i,k}, \beta_{-i,k})$  es la función de utilidad con la que el jugador  $i$  al conectarse al punto de acceso  $p$  obtendrá los pagos de acuerdo a sus decisiones tomadas  $\beta_{i,k}$ .

La canalización disponible para los usuarios del juego planteado está basada en el estándar 802.11g, el cual ofrece un gran ancho de banda en el rango de frecuencia de 2,4 GHz con multiplexación OFDM [16],[17]. Esta banda de frecuencias comprende 11 canales disponibles que no son completamente independientes, un canal se superpone y produce interferencia hasta un canal a 4 canales de distancia. Por tal motivo con el fin de evitar las interferencias causadas por el solapamiento se definen las estrategias del juego como el ancho de banda disponible en el mejor de los casos por los tres canales 1, 6 y 11 los cuales se encuentran lo suficientemente separados para no presentar interferencia entre sí. Aclarando que cada jugador puede elegir como estrategias 1 canal (20MHz), 2 canales (40MHz) o 3 canales (60MHz). Entonces, el perfil de estrategia del juego para un usuario es el vector dado por (2).

$$\beta_{i,k} \in \beta_i \quad (2)$$

Donde  $\beta_i = \{20MHz, 40MHz, 60MHz\}$  es el conjunto de todos los posibles anchos de banda (cantidad de canales) que un jugador puede utilizar como estrategia en el juego.

Para seleccionar una función que permita modelar el comportamiento de las tasas de transferencia de información de acuerdo con las características del canal, es necesario que esta relacione conceptos como capacidad, ancho de banda, potencia y ruido. Por tal motivo, en este trabajo, se define la función de utilidad para todos los jugadores como su eficiencia espectral, es decir, la relación entre su velocidad de transmisión de *Shannon* y el ancho de banda total disponible  $B$  (para este caso,  $B=60MHz$ , ancho de banda total disponible en 802.11g) en la red:

$$u_i(\beta_{i,k}, \beta_{-i,k}) = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{i,p}}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

Entre las variables que conforman (3) se encuentra la potencia  $P$  y asumiendo que el ruido presente en el canal se modela como una variable aleatoria independiente que sigue una distribución normal de media cero y varianza  $\sigma^2$ , luego la potencia del ruido se denota como  $\sigma^2$ . En este caso, se considera que la máxima potencia que puede manejar el receptor, es un número entero de veces la potencia máxima de transmisión de un terminal de usuario, para el escenario puntual a trabajar, y sin perder generalidad se considera por simplicidad que ese número entero es 1 y que la potencia de entrada máxima ( $P_{in_{max}}$ ) del AP es igual a la potencia emitida por una tarjeta de red inalámbrica de un computador portátil cercana a los 32mW.

Por otra parte se tiene la ganancia  $g_{i,k}$  que representa la ganancia de canal entre el usuario  $i$  y el punto de acceso  $p$ , donde características del canal tales como atenuación asociada a la distancia, desvanecimiento y otros se asocian al valor tomado.

### 3 Metodología de solución

Existen distintos conceptos de solución, basados en dos clases de argumentos, los argumentos de dominación y los argumentos de equilibrio, sin embargo los conceptos de solución que son aplicados en la solución del juego planteado se basan en argumentos de equilibrio como:

- **Equilibrio de Nash (NE):** busca maximizar la utilidad y es un estado de la red en la que los usuarios (jugadores) no pueden mejorar su calidad de servicio por cambiar unilateralmente el AP al cual están realizando la conexión.
- **Equilibrio de Satisfacción (SE):** representa cualquier estado de la red donde los usuarios satisfacen sus requerimientos de QoS. La idea de satisfacción es que un jugador está conforme con su decisión si la acción jugada supera o es igual a la capacidad umbral requerida para el servicio y este no cambiará de decisión a menos que tenga un mejor beneficio.
- **Equilibrio de Satisfacción Eficiente (ESE):** es un estado de la red en el que todos los jugadores satisfacen sus limitaciones mediante la acción viable que requiere el menor esfuerzo.

Una vez definido el modelo del juego, se realiza la búsqueda de las soluciones del mismo, guiado por los siguientes pasos de la estructura de solución propuesta:

- Verificación de la Existencia del Equilibrio de Nash (*NE*).
- Obtención de la mejor respuesta (*BR*) para cada caso.
- Solución del juego mediante el *NE*.
- Solución del juego mediante el *ES*.
- Solución del juego mediante *ESE*.

#### A. Concepto de equilibrio

- **Definición 1.** (*Equilibrio de Nash*) *NE*: En el juego  $G = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n\}$ , se dice que el perfil de estrategias puras  $\beta_i^* = b^* = (b_1^*, \dots, b_n^*)$  es un NE si para cada jugador  $u_i$   $(b_i^*, b_{-i}^*) \geq u_i(b_i, b_{-i}^*)$  para todo  $b_i$ . Es decir, para cada jugador  $i$ ,  $b_i^*$  es una respuesta óptima a  $b_{-i}^*$ . [12]
- **Definición 2.** (*Equilibrio de Satisfacción*) *SE*: En el juego  $G = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n; f_i\}$ , se dice que el perfil de estrategias puras  $\beta_i^+$  es un *SE* si para todo  $i$   $\beta_i^+ \in f_{-i}(\beta_i^+)$ . [13]
- **Definición 3.** (*Equilibrio Eficiente de Satisfacción*) *ESE*: Define un mapeado  $c_i : \beta_i \rightarrow [0, 1]$  para todo  $i$  considerando el juego  $G = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n; f_i\}$ , luego se dice que para todo  $(i, \beta_i^*, \beta_i')$  el perfil de estrategias puras  $\beta_i'$  es más costoso que  $\beta_i^*$  si y solamente si  $c_i(\beta_i^*) < c_i(\beta_i')$ . Luego un perfil de estrategias  $\beta_i^*$  es un *ESE* si y solamente si para todo  $i$ ,  $\beta_i^* \in \arg \min_{\beta_i \in f_{-i}(\beta_i^*)} c_i(\beta_i)$ . [14]

### B. Existencia de los Equilibrios

Antes de iniciar la solución del juego planteado mediante la búsqueda de los puntos de equilibrios de Nash, es pertinente probar si efectivamente dichos puntos de equilibrios existen. Para esto, se cuentan con distintos teoremas con los cuales se puede comprobar o no tal existencia, e incluso la referencia [17] plantea una metodología estructurada para la determinación de la misma, indicando que teoremas aplicar según el tipo de juego con que se está trabajando. El teorema 1 ha sido aplicado para demostrar la existencia del NE y han sido demostrados en [18],[19].

- **Teorema 1.** Existencia del equilibrio de Nash (NE). Sea el juego  $G = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n\}$ , tal que, para todo jugador  $i$ , se cumple:  $\beta_i$  es un subconjunto no vacío, compacto y convexo de un espacio  $\mathbb{R}^k$ .  $u_i$  es continua en todo su dominio  $\beta = \beta_1\beta_2, \dots, \beta_3$  y es cuasicóncava en la variable  $b_1$ . Si se cumple estas condiciones, ó el juego  $G$  es finito existe al menos un EN en estrategias mixtas. [12]



- **Teorema 2.** Existencia de Satisfacción (SE). En el juego  $G' = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n; f_i\}$ , sea el conjunto de acciones  $\beta_i$  un conjunto no vacío, convexo y compacto, y la correspondencia  $F(\beta_i)$  es un grafo cerrado y un conjunto no vacío y convexo en el conjunto de acciones  $\beta_i$ . Entonces, el juego  $G'$  tiene al menos un *SE*. [13]
- **Teorema 3.** Existencia de Satisfacción Eficiente (ESE). En el juego  $G'' = \{I; \{\beta_i\}_{i=1}^n; \{U_i\}_{i=1}^n; f_i\}$ , con  $\beta_i$  un conjunto finito para todo  $i$ , funciones de costo  $c_i : \beta_i \rightarrow [0,1]$  y un conjunto  $\beta_{SE}$  no vacío, siempre tiene al menos un *ESE*. [14]

Como resultado de aplicar el teorema 1 sobre la función de utilidad definida en (3), dado que esta es continua en todo el dominio de estrategias y cuasicóncava, y el conjunto de estrategias  $\beta_{i,k}$  es un subconjunto no vacío, compacto y convexo de un espacio  $\mathbb{R}^k$ , y además el juego es finito, por lo tanto se dice que existe al menos un equilibrio de Nash para el juego planteado en estrategias mixtas.

### C. Solución del Juego

#### 1) Solución Mediante el Equilibrio de Nash

La utilidad (eficiencia espectral) para cada jugador, la cual se muestra en la Tabla 1, es denotada como  $u_i^k$ , donde  $i$ : jugador,  $k$ : estrategia, y representa la utilidad obtenida por el jugador  $i$  al jugar una estrategia de ancho de banda  $k$  (cantidad de canales), y  $B$  es el ancho de banda máximo manejado por cada AP, para este caso  $60MHz$ .

De la dinámica de mejor respuesta, se generan las siguientes condiciones mediante las cuales se evalúa el equilibrio de Nash para cada estrategia seleccionada por cada jugador, lo cual implica la selección de un AP.

**Condición 1:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} \geq 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} \geq 1$

**Condición 2:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} \geq 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} \leq 1$

**Condición 3:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} \leq 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} \geq 1$

**Tabla 1:** Matriz de Utilidades para los usuarios

		Usuario2	
		AP1	AP2
Usuario1	AP1	$u_1^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{1,1}}{\sigma^2} \right)$ $u_2^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{2,1}}{\sigma^2} \right)$	$u_1^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{1,1}}{\sigma^2} \right)$ $u_2^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{2,2}}{\sigma^2} \right)$
	AP2	$u_1^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{1,2}}{\sigma^2} \right)$ $u_2^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{2,1}}{\sigma^2} \right)$	$u_1^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{1,2}}{\sigma^2} \right)$ $u_2^k = \sum_p \frac{\beta_{i,k}}{B} \log_2 \left( 1 + \frac{Pg_{2,2}}{\sigma^2} \right)$

**Condición 4:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} \leq 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} \leq 1$

De acuerdo con las condiciones 1 a 4 se identifican 3 casos en los cuales se evalúa el equilibrio de Nash, los casos identificados son:

**Caso 1:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} > 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} > 1$  o  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} < 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} < 1$

**Caso 2:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} = 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} = 1$

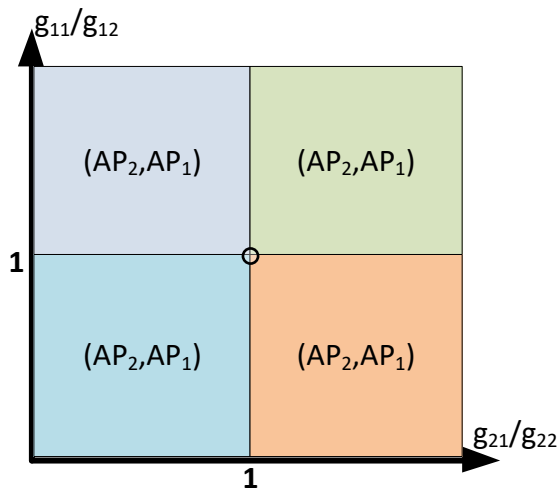
**Caso 3:**  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} < 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} > 1$  o  $\frac{g_{1,1}}{g_{1,2}} > 1$  y  $\frac{g_{2,1}}{g_{2,2}} < 1$

El caso 1 identifica un escenario en el cual los dos usuarios tienen su mejor canal sobre el mismo AP, lo cual implica que los dos jugadores seleccionan el mismo AP para realizar su transmisión, y dado que el máximo ancho de banda manejado por cada AP es  $60MHz$ , y denotando el máximo ancho de banda que un usuario puede seleccionar sobre un AP como  $(\beta_{i,kmax} = 60MHz)$ , luego, en este caso los perfiles de estrategias son de la forma  $((\beta_{i,k}, \beta_{i,kmax} - \beta_{i,k}))$  o de la forma  $((\beta_{i,kmax} - \beta_{i,k}, \beta_{i,k}))$ , donde, si  $g_{11} > g_{21}$  o  $g_{12} > g_{22}$  el equilibrio de Nash es  $(\beta_{i,kmax}, 0)$ , pero si  $g_{11} < g_{21}$  o  $g_{12} < g_{22}$  el equilibrio de Nash es  $(0, \beta_{i,kmax})$ , ya que el usuario que tenga el mejor canal seleccionará la estrategia que permite maximizar su utilidad, que en este caso es jugar  $\beta_{i,kmax}$  y dado que los dos jugadores seleccionan el mismo AP, el otro jugador no tiene otra alternativa más que no transmitir.

El caso 2 identifica un escenario en el cual los dos usuarios se pueden conectar a cualquier AP y se esperaría que si el jugador 1 se conecta al AP1

lo haga utilizando el máximo ancho de banda para maximizar su utilidad, por lo tanto, el jugador 2 se conectaría al AP2 utilizando el máximo ancho de banda, o viceversa; sin embargo, este caso es improbable, dado que las ganancias de canal son realizaciones de variables aleatorias que siguen distribuciones continuas, razón por la cual, la probabilidad que las ganancias sean exactamente iguales es igual a cero y por lo tanto el caso 2 no sea real.

El caso 3 identifica un escenario en el cual cada usuario se conecta a un AP diferente, por ejemplo el jugador 1 selecciona el AP1 y por lo tanto el jugador 2 selecciona el AP2, por lo tanto, la estrategia que maximiza la utilidad de cada jugador es seleccionar el máximo ancho de banda posible para cada AP el cual es  $(\beta_{i,kmax} = 60MHz)$ .



**Figura 2:** Perfiles de estrategias del equilibrio de Nash

En la Figura 2, se muestran los perfiles de estrategias para cada escenario y las selecciones realizadas de acuerdo al escenario, de acuerdo a los equilibrios y selecciones, se procede a la realización del algoritmo que permite la selección del AP basado en las estrategias de ancho de banda

que decida jugar.

### 2) Solución mediante el Equilibrio de Satisfacción

En el concepto de solución conocido como Equilibrio de Satisfacción (SE) el objetivo principal de cada jugador es satisfacer sus necesidades superando las tasas de transferencia requeridas para realizar cualquier tarea en la red, pudiendo elegir la estrategia que mejor le convenga a cada usuario de acuerdo a las obtenidas en la región de satisfacción.

En el algoritmo mostrado en 1, se implementa el principio de satisfacción de una forma sencilla; si el jugador se encuentra satisfecho (se satisface el umbral definido) mantiene la estrategia actual, en caso de no satisfacerse el umbral definido, se selecciona de forma aleatoria una estrategia del conjunto de estrategias, con la cual se reemplaza la estrategia actual.

---

**Algorithm 1** Algorithm de Equilibrio de Satisfacción (SE)

---

```
1: Function: SE (Umbral, n)
2:    $s_i \leftarrow$  Seleccionar estrategia
3:   For  $i = 1$  to  $n$ 
4:     Jugar y observar el resultado
5:     if  $u_i < \text{Umbral}$  Then
6:        $si \leftarrow$  Seleccionar estrategia
7:     End if
8:   End for
9: Return  $s_i$ 
```

---

En este caso siempre se estará buscando una estrategia cuando la utilidad sea menor al umbral requerido, y de esta manera una vez todos los jugadores se encuentran satisfechos, no existirá agente alguno que desee cambiar de estrategia, dado que se ha alcanzado la condición de equilibrio.

### 3) Solución mediante el Equilibrio de Satisfacción Eficiente

Similar al equilibrio de satisfacción, el concepto de solución conocido como Equilibrio de Satisfacción Eficiente (ESE) es el valor del ancho de banda para el cual la capacidad es el valor más pequeño dentro de las capacidades obtenidas en la región de equilibrios de satisfacción. Es decir,

la capacidad y el ancho de banda seleccionado por este concepto de solución garantizan la calidad de servicio requerida por un usuario con un valor lo más cercano posible de la capacidad umbral, buscando la optimización de recursos.

En el algoritmo 2, se muestra una variación del concepto de solución anterior. En este caso siempre estará buscando la estrategia que supere o iguale y que más se aproxime al umbral requerido. Es decir, solo retorna la estrategia cuando encuentre una que cumpla con la condición establecida anteriormente. La función SeleccionarMínimo(SE) selecciona el equilibrio de satisfacción (SE) mínimo necesario con el cual se satisface los requerimientos del usuario en capacidad.

---

**Algorithm 2** Algoritmo de Equilibrio de Eficiente Satisfacción (ESE)

---

```
1: Function: SE (Umbral, n)
2:    $s_i \leftarrow$  Seleccionar estrategia
3:    $j = 0$ 
4:   For  $i = 1$  to  $n$ 
5:     Jugar y observar el resultado
6:     if  $u_i < \text{Threshold}$  Then
7:        $s_i \leftarrow$  Seleccionar estrategia
8:     else
9:        $j = j + 1$ 
10:       $SE(j) = s_i$ 
11:    End if
12:  End for
13:   $ESE = \text{Seleccionar mínimo}(SE)$ 
14: Return  $s_i$ 
```

---

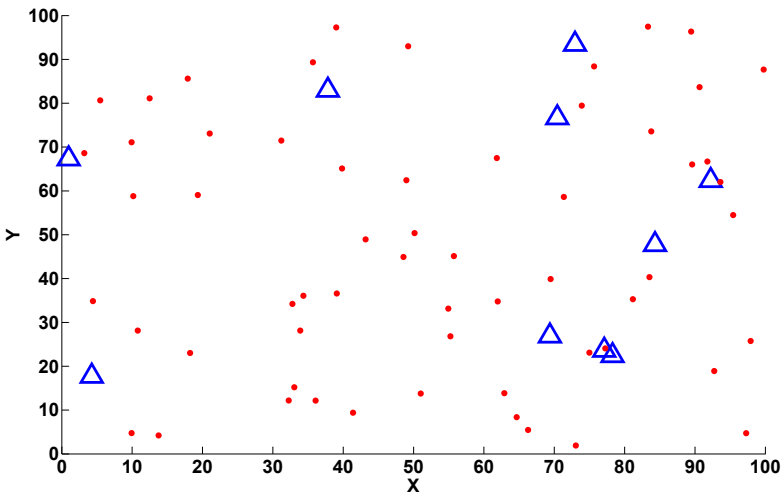
## 4 Resultados

En el modelo del juego, existe un número determinado de canales en paralelo, los cuales están limitados por el mismo nivel de potencia máxima. El objetivo principal es distribuir la potencia total entre los canales con el

fin de maximizar la eficiencia espectral de cada uno de ellos. Este concepto asignación óptima de potencia en canales paralelos se realiza mediante el algoritmo de Water-Filling. [15]

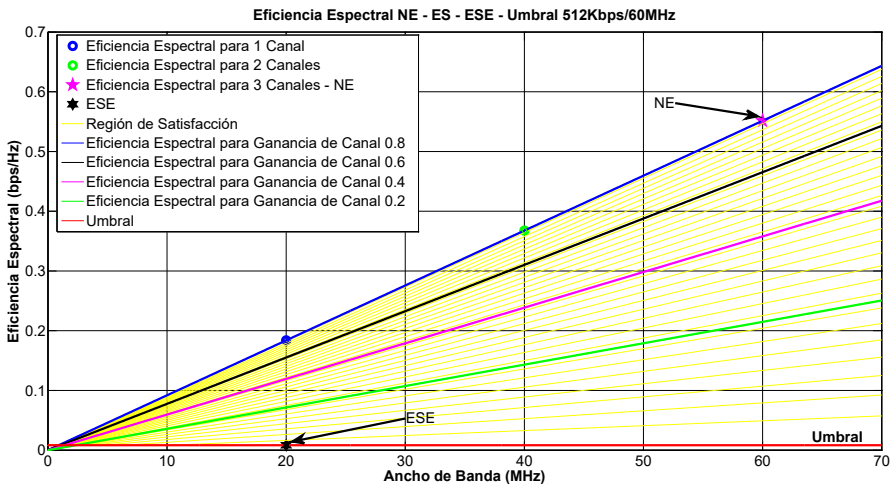
Generalizando el modelo del Sistema, se implementa un escenario de simulación con 10 APs y 60 usuarios los cuales son uniformemente distribuidos de manera aleatoria en un área cuadrada de  $100m \times 100m$  como se muestra en la Figura 3. A pesar de que todos los APs son de libre acceso, la cobertura de cada uno es limitada, por lo que un equipo de usuario puede no tener la posibilidad de conectarse a cada AP.

En el escenario de simulación, los resultados numéricos se obtienen para diferentes valores de ganancia de canal, particularmente en las Figuras 4, 5 y 6 se grafica la eficiencia espectral para ganancias de canal iguales a 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8, con una variación de la tasa de transferencia requerida de  $512Kbps$ ,  $2Mbps$  y  $10Mbps$ ; se establece una potencia de transmisión de  $32mW$  y se asume una potencia de ruido del orden de  $100\mu W$ .



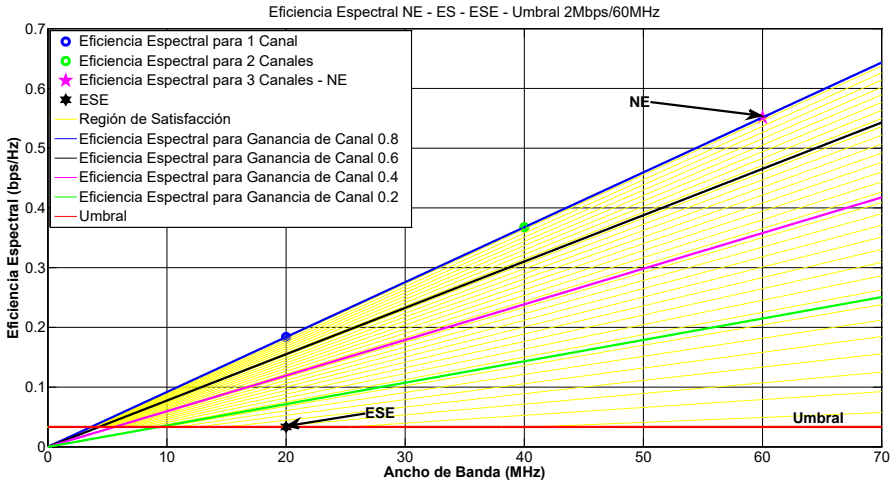
**Figura 3:** 10 APs y 60 Usuarios Aleatoriamente Distribuidos en un área Cuadrada de  $100m \times 100m$ .

En la Figura 4 se puede apreciar el comportamiento de los diferentes equilibrios para las diferentes ganancias de canal, cuando el umbral está dado para la capacidad requerida de 512Kbps, donde el NE garantiza satisfacer la capacidad requerida utilizando el 100% de los recursos disponibles (ancho de banda de 60MHz), sin embargo, se evidencia en la región sombreada que corresponde a la zona de equilibrio de satisfacción, es posible satisfacer los requerimientos de tasa de transferencia para cualquiera de las otras dos posibles estrategias seleccionadas (20MHz o 40MHz), luego, el ESE permite reducir al mínimo los recursos requeridos de ancho de banda que permitan garantizar la tasa de transferencia requerida.



**Figura 4:** Equilibrio para Umbral 512Kbps/60MHz.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de los diferentes equilibrios cuando el umbral corresponde a una capacidad requerida de 2Mbps, situación en la cual se presenta una asignación de recursos eficiente por medio del ESE, donde según los criterios de asignación de recursos propuestos por los tres equilibrios, es posible garantizar la capacidad requerida mediante la selección de cualquiera de las posibles estrategias de juego.



**Figura 5:** Equilibrio para Umbral 2Mbps/60MHz.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de los diferentes equilibrios para una capacidad requerida de 10Mbps, en este caso, puede apreciarse que no todas las posibles estrategias que el jugador puede seleccionar son válidas para alcanzar el equilibrio, en otras palabras, para este caso particular es posible apreciar que se satisfacen los requerimientos impuestos sobre la capacidad solamente para las estrategias de 40MHz y 60MHz cuando la ganancia de canal es superior a 0.6, de la misma manera se evidencia que para una ganancia de canal igual a 0.4 la única estrategia posible para garantizar satisfacción es 60MHz y ninguna estrategia posible satisface el requerimiento de capacidad cuando la ganancia de canal es 0.2. En los

escenarios presentados en las Figuras 4, 5 y 6 puede apreciarse que el ESE plantea una mejora significativa en la asignación de recursos radio, en el caso estudiado, ancho de banda, dado que para el caso observado en la Figura 4 la mejora porcentual en la asignación de recursos del orden de 33% para la ganancia de canal de 0.8, de igual manera se aprecia la mejoría en las Figuras 5 y 6, donde el porcentaje de mejora es del orden del 30% y 20% respectivamente.



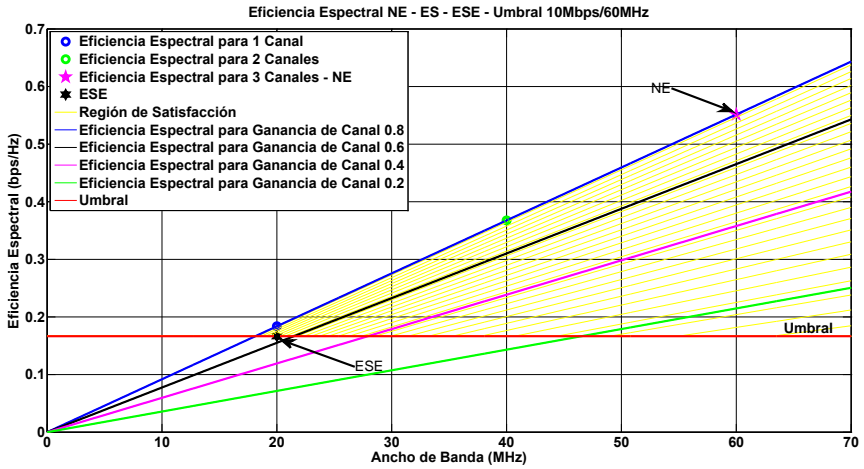


Figura 6: Equilibrio para Umbral 10Mbps/60MHz.

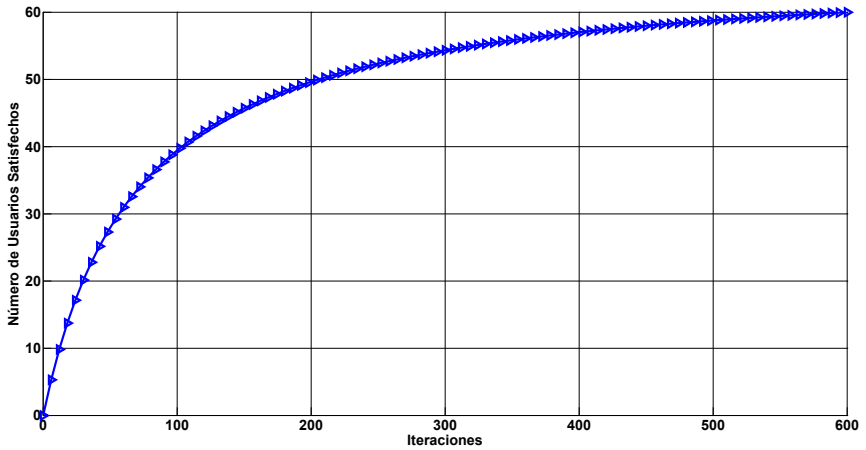


Figura 7: Número de Usuarios que alcanzan el ESE vs Número de Iteraciones.

En la Figura 7, se muestra el número de iteraciones requeridas para alcanzar el ESE para todos los usuarios cuando este existe, esta cantidad de iteraciones es aproximadamente igual al número de APs multiplicado por la cantidad de usuarios, comportamiento que se evidencia en los resultados de las múltiples simulaciones realizadas con diferente cantidad de APs y usuarios.

## 5 Conclusiones

En este artículo se identificaron las regiones de eficiencia espectral en las cuales se garantiza QoS basado en capacidad bajo restricciones de ancho de banda en redes inalámbricas IEEE 802.11, donde se puede apreciar que el Equilibrio de Nash no permite garantizar una eficiencia espectral ni energética, ya que las estrategias obtenidas como solución para cada uno de los usuarios corresponden al máximo ancho de banda y máximo nivel de potencia emitido por la tarjeta de red del terminal inalámbrico. De este modo se consumirá una alta potencia en el dispositivo lo que disminuiría el tiempo de duración de su batería si se utiliza este concepto de solución, a su vez se utilizará el máximo ancho de banda manejado por el AP al cual se asocia el usuario, lo cual redundaría en minimizar la cantidad de usuarios asociados a un mismo AP. El equilibrio de Satisfacción permitía definir las regiones de eficiencia espectral que permiten garantizar cumplimiento de QoS asociada al umbral de capacidad requerido y a la ganancia de canal, lo cual permite afirmar que el equilibrio de satisfacción no necesariamente existe y por consiguiente la existencia del Equilibrio Eficiente de Satisfacción se encuentra igualmente condicionada. Como trabajo futuro, se busca

realizar un estudio más detallado de las regiones de eficiencia espectral de QoS involucrando restricciones de potencia y retardo, que permita proponer algoritmos eficientes de selección basadas en restricciones de potencia, ancho de banda y retardo.

## Referencias

- [1] R. Raghavendra, E. M. Belding, K. Papagiannaki, and K. C. Almeroth, “Understanding handoffs in large IEEE 802.11 wireless networks,” *Proceedings of the 7th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement - IMC '07*, p. 333, 2007. 150, 151
- [2] D. Gong and Y. Yang, “AP association in 802.11n WLANs with heterogeneous clients,” *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pp. 1440–1448, Mar. 2012. 150, 151
- [3] E. Y. Mohammed, “Acceso a Internet vía WiFi-WiMax,” 2012. 151
- [4] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, and X. Chu, “Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, pp. 70–78, Dec. 2012. 151
- [5] C. Jiang, Y. Chen, Y. Gao, and K. J. R. Liu, “Joint Spectrum Sensing and Access Evolutionary Game in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, pp. 2470–2483, May 2013. 151
- [6] A. Mesodiakaki, F. Adelantado, L. Alonso, and C. Verikoukis, “Energy-efficient user association in cognitive heterogeneous networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 22–29, July 2014. 151
- [7] C. Jiang, Y. Chen, K. J. R. Liu, and Y. Ren, “Renewal-theoretical dynamic spectrum access in cognitive radio network with unknown primary behavior,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 3, pp. 406–416, 2013. 151
- [8] C. Jiang, Y. Chen, Y.-H. Yang, C.-Y. Wang, and K. J. R. Liu, “Dynamic Chinese Restaurant Game: Theory and Application to Cognitive Radio Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, pp. 1960–1973, Apr. 2014. 151
- [9] C. Jiang, Y. Chen, and K. J. R. Liu, “Multi-Channel Sensing and Access Game: Bayesian Social Learning with Negative Network Externality,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 4, pp. 2176–2188, 2014. 151
- [10] M. Haddad, H. Sidi, P. Wiecek, and E. Altman, “Automated dynamic offset applied to cell association,” *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, vol. CoRR, pp. 1788–1796, Apr. 2014. 151
- [11] E. Astaiza Hoyos, H. F. Bermúdez Orozco, and D. L. Trujillo Dávila, “Access point Selection in 802.11 Wireless Networks Guaranteeing Minimum QoS,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, no. 20, pp. 115–137, 2014. 151

- [12] J. Pérez, E. Cerdá, and J. Jimeno, “Teoría de Juegos,” p. 513, 2004. 151, 156
- [13] S. Ross and B. Chaib-draa, “Advances in Artificial Intelligence,” vol. 4013, pp. 61–72, 2006. 151, 156, 157
- [14] S. M. Perlaza, H. Tembine, S. Lasaulce, and M. Debbah, “Quality-Of-Service Provisioning in Decentralized Networks: A Satisfaction Equilibrium Approach,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 6, pp. 104–116, Apr. 2012. 151, 156, 157
- [15] T. M. Cover and J. A. Thomas, “Elements of Information Theory, 2nd Edition,” p. 748, 2006. 152, 162
- [16] H. Rohling, “OFDM,” p. 253, 2011. 153
- [17] R. Nee, Richard van and Prasad, “OFDM for Wireless Multimedia Communications,” p. 280, 2000. 153
- [18] S. Lasaulce, M. Debbah, and E. Altman, “Methodologies for analyzing equilibria in wireless games,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, pp. 41–52, Sept. 2009. 156
- [19] K. Mittal, E. M. Belding, and S. Suri, “A game-theoretic analysis of wireless access point selection by mobile users,” *Computer Communications*, vol. 31, pp. 2049–2062, June 2008. 156