

## Ingeniería y Ciencia

Ingeniería y Ciencia

ISSN: 1794-9165

ingciencia@eafit.edu.co

Universidad EAFIT

Colombia

Astaiza Hoyos, Evelio; Bermúdez Orozco, Héctor Fabio; Trujillo Dávila, Dora Lucia  
Selección de access point en redes inalámbricas 802.11 garantizando mínima QoS

Ingeniería y Ciencia, vol. 10, núm. 20, julio-diciembre, 2014, pp. 115-137

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83531311008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Selección de *access point* en redes inalámbricas 802.11 garantizando mínima QoS

Evelio Astaiza Hoyos <sup>1</sup>, Héctor Fabio Bermúdez Orozco <sup>2</sup> y Dora Lucia Trujillo Dávila <sup>3</sup>

Recepción: 06-03-2013, Aceptación: 29-04-2014

Disponible en línea: 01-07-2014

MSC:91A80, PACS:89.20.Ff

---

## Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada para abordar el problema de asociación de un usuario a un *access point* inalámbrico (AP) en una red 802.11 multicelda, en la cual se presta servicio a un gran número de usuarios; cada usuario de forma egoísta se conecta al *access point* que le permite garantizar una mínima tasa de transferencia de información, determinada de manera arbitraria por el servicio requerido por el usuario. Para ello, se modelan las interacciones en la red inalámbrica como un juego no cooperativo, posteriormente se introduce el concepto de equilibrio de satisfacción (ES) y se propone el algoritmo que permite resolver el problema de asociación bajo el concepto de ES; finalmente se ilustran los resultados de simulación obtenidos en un escenario de red donde por simplicidad y sin perder generalidad se asumen dos usuarios y dos puntos de acceso.

**Palabras clave:** juegos no cooperativos; redes inalámbricas; 802.11; calidad del servicio; equilibrio de satisfacción; comunicaciones verdes.

---

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

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

<sup>3</sup> Ing., [dlucia1987@hotmail.com](mailto:dlucia1987@hotmail.com), Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

---

## *access point* Selection in 802.11 Wireless Networks Guaranteeing Minimum QoS

---

### Abstract

In this paper we present the research results that conducted to address the problem of associating a user to a wireless *access point* (AP) in a multicell 802.11 network in which service a large number of users, each user selfishly is connected to the *access point* that allows it to guarantee a minimum data transfer rate, determined arbitrarily by the user required service. To do this, the interactions are modeled on the wireless network as a non-cooperative game, then the satisfaction equilibrium concept (SE) is introduced and the algorithm to solve the problem of association under this concept is proposed; finally we illustrate the simulation results obtained in a network scenario where, for simplicity and without loss of generality two users and two *access points* are assumed.

**Key words:** noncooperative games; wireless networks; 802.11; quality of service; satisfaction equilibrium; green communications.

---

## 1 Introducción

En la última década, la teoría de juegos ha jugado un papel central en el análisis de muchos problemas relacionados con la asignación de recursos de radio en redes inalámbricas. De igual manera, el problema de proveer calidad del servicio (QoS) puede ser modelado como un juego no cooperativo, asumiendo que los dispositivos de radio (jugadores) de manera autónoma pueden establecer su configuración de transmisión (acciones) para maximizar de forma egoísta su propio nivel de calidad de servicio (función de utilidad). Como consecuencia, el concepto de equilibrio introducido por Nash en [1] ha sido ampliamente utilizado.

Recientemente, en [2] se ha formalizado un nuevo concepto de equilibrio para un determinado tipo de limitaciones. En dicho trabajo, a este tipo de equilibrio se lo denomina equilibrio satisfacción (SE). En este caso, el SE representa cualquier estado de la red en el cual los transmisores satisfacen sus requerimientos de calidad de servicio, independientemente de cual sea el nivel de calidad de servicio alcanzado (sea o no el máximo nivel).

En orden a que el acceso a redes 802.11 compromete a múltiples usuarios (jugadores), cada uno de ellos con intereses egoístas, la teoría de juegos es

una herramienta apropiada para el estudio de este tipo de sistemas. Específicamente, la teoría de juegos ha sido utilizada para analizar topologías de redes [3], [4], enrutamiento de paquetes [5], [6] y [7] y protocolos de transporte [8]. En el área de las comunicaciones inalámbricas, la teoría de juegos se ha utilizado para analizar una gran variedad de problemas entre los cuales se encuentran enrutamiento multisalto [9] y [10], control de potencia [11] y [12], incentivos de participación [13] y valor del acceso inalámbrico [14], [15] y [16].

Entonces, modelar como un juego una red inalámbrica en la cual influyen un determinado número de transmisores y receptores, ayuda a obtener estratégicamente modelos de solución utilizando un concepto de solución de equilibrio como lo es el equilibrio de satisfacción. Para este caso particular, el juego busca garantizar una mínima QoS basada en capacidad para los usuarios de una red utilizando como función de utilidad la ecuación de *Shannon* mediante la cual se busca obtener un conjunto de soluciones. [17], [18], [19], [20].

En trabajos previos, como en [17], se aborda el problema de selección de AP basado en la cantidad de usuarios asociados y a la distancia desde el usuario; en [18] se aborda el problema de asociación de usuarios al AP partiendo de un modelo que busca la equidad en la asignación de recursos; en [19] se aborda el problema de asociación de AP visto desde la perspectiva de maximización de la eficiencia espectral; en [20] se busca abordar el problema de maximización de la capacidad de la red inalámbrica; sin embargo hasta la fecha de desarrollo de la investigación realizada no se han efectuado aportes respecto al estudio del problema de selección de AP que permita maximizar la capacidad de cada usuario conectado buscando satisfacer sus necesidades de QoS.

Por ello, el objetivo de la investigación es desarrollar un algoritmo basado en el equilibrio de satisfacción que permita resolver el problema de selección de *access point* en redes 802.11 que ofrezca un óptimo balance entre potencia de transmisión y tasa de transferencia de información, que a futuro pueda ser considerado para la implementación del estándar de redes inalámbricas cognitivas 802.11, generando de esta manera un aporte significativo a la solución del problema de asociación óptima de *access point* inalámbrico que permita garantizar la calidad del servicio requerida por cada uno de los usuarios de la red, donde a su vez, se vislumbra un

aporte en la implementación de tecnologías inalámbricas verdes, dado que el algoritmo de selección propuesto se basa en estrategias de potencia para alcanzar la capacidad requerida, lo cual implica que para lograr la mínima tasa requerida se necesita la mínima potencia que permite conseguir la tasa deseada.

## 2 Metodología

Inicialmente se modela la red inalámbrica multicelda como un juego no cooperativo en el cual se contempla un número finito de jugadores  $i$ , un número finito de puntos de acceso  $k$  (*AP*) y los múltiples canales de comunicación  $h_{i,k}$  entre cada uno de los usuarios y el *access point* mediante el cual obtendrá una conexión a la red. Posteriormente, se evalúa tanto la existencia del equilibrio de Nash como del equilibrio de satisfacción de acuerdo a [1] y [2], para posteriormente plantear los algoritmos que permiten obtener tanto el equilibrio de Nash como el equilibrio de satisfacción y analizar los resultados obtenidos mediante simulación.

### 2.1 Equilibrio de satisfacción

En esta sección se introduce el concepto del equilibrio de satisfacción (ES), un nuevo concepto para dar solución a un juego diferente a maximizar utilidades o minimizar costos. En este concepto se hace referencia a que el objetivo principal de cada jugador es satisfacer sus necesidades en cuanto a la capacidad requerida para desempeñar una tarea en la red de acuerdo a las posibles acciones de cada uno de ellos disponibles como estrategias del juego.

Por lo tanto, sin importar la configuración de la red, esta puede ser modelada como un juego no cooperativo de la forma  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}\}$ , donde el conjunto  $K$  representa a los usuarios de la red (transmisores - jugadores) y para todo  $k \in K$ , el conjunto  $S_k$  representa el conjunto de acciones del usuario  $k$ , por ejemplo, política de asignación de potencia, política de asignación de ancho de banda, esquema de modulación, etc., un perfil de acciones es un vector  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_K) \in \mathbf{S}$ , donde  $\mathbf{S} = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_K$ . Denotando como  $\mathbf{s}_{-k} = (s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_{k+1}, \dots, s_K) \in$

$\mathbf{S}_{-k} \equiv S_1 \times S_2 \times \dots \times S_{k-1} \times S_{k+1} \times \dots \times S_K$ , al vector obtenido por la extracción de la  $k$ -ésima componente del vector  $\mathbf{s}$ , luego puede escribirse el vector como  $\mathbf{s} = (s_k, \mathbf{s}_{-k})$  para hacer énfasis en su  $k$ -ésima componente. Para todo  $k \in K$  la función  $u_k : S \rightarrow \mathbb{R}$  es la función de utilidad del jugador  $k$ . Esta función determina que tan conveniente es desde la perspectiva de la calidad del servicio, una determinada acción  $s_k \in \mathbf{S}_k$  con respecto a las acciones adoptadas por todos los demás transmisores  $\mathbf{s}_{-k}$ . Por lo anterior, las utilidades más altas se asocian a las mejores acciones de cada jugador. Cuando el objetivo de cada transmisor es maximizar egoístamente su propia utilidad, independientemente de la utilidad obtenida por sus pares, una configuración de red estable está dada por el equilibrio de Nash - *NE*. Un *NE* se define como sigue:

**Definición 1: Equilibrio de Nash en Estrategias Puras [1]:**

En el juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}\}$ , un perfil de acciones  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_K \in \mathbf{S})$ , es un equilibrio de Nash en estrategias puras, si este satisface para todo  $k \in K$  y para todo  $s'_k \in \mathbf{S}_k$ ,

$$u_k(s_k, \mathbf{s}_{-k}) \geq u_k(s'_k, \mathbf{s}_{-k}) \quad (1)$$

Cuando las restricciones (condiciones QoS) se imponen a las utilidades que obtiene cada transmisor en el juego  $G$ , el *NE* no es ya una solución adecuada. En presencia de restricciones, el conjunto de acciones que cada transmisor puede tomar reduce al conjunto de acciones que verifica las limitaciones individuales, dadas las acciones adoptadas por los otros transmisores.

Bajo esta formulación, se introduce el concepto de solución llamado equilibrio de satisfacción, en el cual se considera que los jugadores del juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{f_k\}_{k \in K}\}$  están interesados en satisfacer sus propias utilidades teniendo en cuenta las restricciones que para este caso están relacionadas con la capacidad mínima requerida por un usuario para soportar un servicio específico de tal manera que se garantice QoS desde la perspectiva de capacidad. Aquí la idea de satisfacción es intuitiva, por lo tanto se dice que un jugador está conforme con su decisión si la acción jugada supera o es igual a la capacidad umbral requerida para el servicio; una vez un jugador satisface sus restricciones individuales, este no se interesa en cambiar su acción, y por lo tanto se observa un equilibrio si

todos los transmisores se satisfacen simultáneamente. A esta situación se la conoce como un equilibrio de satisfacción, el cual se define a continuación:

**Definición 2 :Equilibrio de Satisfacción - *ES*:** Un perfil de acciones  $s^+$  es un *ES* para el juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{f_k\}_{k \in K}\}$  si  $\forall k \in K, s_k^+ \in f_{-k}(s_k^+)$ , donde  $f_{-k}(\mathbf{s}_{-k})$ , está definida como:

$$f_k(s_{-k}) = \{s_k \in S_k : u_k(s_k, \mathbf{s}_{-k}) \geq \Gamma_k\} \quad (2)$$

donde  $\Gamma_k$  es la capacidad umbral requerida por cada usuario  $k$  [16]. Entonces,

$$S_{ES} \equiv \{s \in S : \forall k \in K, s_k \in f_k(s_{-k})\} \subseteq S \quad (3)$$

**2.1.1 Existencia y Unicidad del *ES*** La existencia de un *ES* en el juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{f_k\}_{k \in K}\}$  depende principalmente de los umbrales determinados por la función de utilidad. Por ejemplo, sea la correspondencia  $F : S \rightarrow 2^S$  la cual se define como:  $F(s) = (f_1(\mathbf{s}_{-k}), f_2(\mathbf{s}_{-k}), \dots, f_k(\mathbf{s}_{-k}))$  por lo tanto un equilibrio de satisfacción existe si y solo si:

$$\exists \mathbf{s} \in \mathbf{S} : \mathbf{s} \in F(\mathbf{s}) \quad (4)$$

Esta formulación permite utilizar los teoremas existentes de punto fijo para proporcionar condiciones necesarias y suficientes para la existencia del equilibrio de satisfacción, por ejemplo, del teorema de punto fijo de Kakutani [21] puede escribirse la siguiente proposición:

**Proposición 1 (Existencia del Equilibrio de Satisfacción):** En el juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}\}$ , sea  $\mathbf{S}$  el conjunto de acciones no vacío, compacto y convexo, y sea la correspondencia  $F(\mathbf{s})$  la cual presenta un grafo cerrado, no vacío y convexo sobre el conjunto de acciones  $\mathbf{S}$ , luego el juego  $G$  tiene al menos un *ES*.

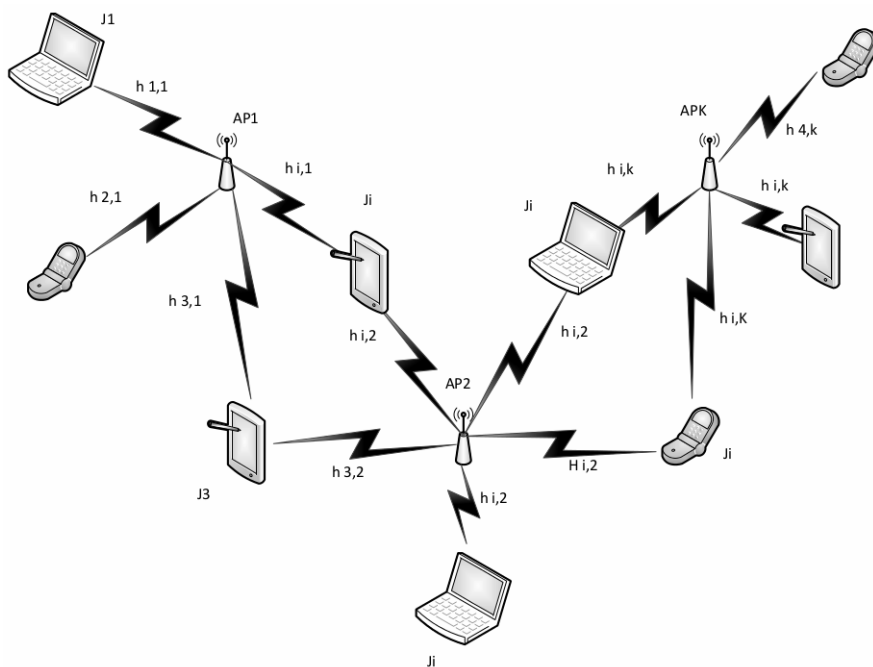
Es de tener en cuenta que en la Proposición anterior no se imponen condiciones (por ejemplo, la continuidad) sobre las funciones de utilidad  $\{U_k\}_{k \in K}$ , para garantizar la existencia de la *SE*. En efecto, desde la definición 2, se puede entender que una condición necesaria y suficiente para la existencia de una *SE* es la viabilidad de las restricciones, es decir, la

existencia de al menos un perfil de acción que satisface simultáneamente todas las restricciones.

## 2.2 Modelo del sistema

Para este trabajo se ha seleccionado como modelo un juego no cooperativo, en el cual se tiene a cada jugador como un ser racional y egoísta que va a actuar de acuerdo con sus necesidades sin importar en gran medida las elecciones que realicen los demás jugadores.

El modelo del juego planteado se puede visualizar en la Figura 1, en el cual se puede ver un número finito de jugadores  $i$ , un número finito de puntos de acceso  $k$  ( $AP$ ) y los múltiples canales de comunicación  $h_{i,k}$  entre cada uno de los usuarios y el *access point* mediante el cual obtendrá una conexión a la red.



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

El juego se puede plantear como un juego de forma estratégica  $G = \{(i = 1, 2, \dots, n); P_{k,0}, P_{k,1}, \dots, P_{k,i}; U_k(P_k, P_{-k})\}$  donde  $i$  es el número de jugadores o usuarios de la red,  $P_{i,k}$  las potencias que equivalen a cada una de las posibles estrategias que tiene disponible cada jugador y  $U_k$  como función de utilidad que dependerá básicamente del nivel de potencia de acuerdo a la estrategia seleccionada por cada jugador. Inicialmente el planteamiento de este problema se hace para un juego de una red de  $ixk$ , es decir,  $i$  número de jugadores y  $k$  número de puntos de acceso. Pero por simplicidad y sin perder generalidad, se trabajará como un juego de  $2x2$ , en el cual la solución y el tratamiento que se le haga a este tipo de red son extensibles a un juego de múltiples elementos participantes en el juego, de acuerdo a que en el caso más general, que es aquel en el cual el modelo del canal corresponde al canal interferente, donde la función de utilidad corresponde a la ecuación de capacidad del canal, la cual es una región no vacía [22], compacta y convexa, donde para cada usuario individual en una red de  $k$  usuarios, la capacidad está dada por la ecuación 7, luego los resultados obtenidos en un escenario  $2x2$  o  $ixk$ , satisfacen la proposición de existencia del equilibrio de Nash y del equilibrio de satisfacción.

Es importante resaltar que cada uno de los transmisores tiene una potencia limite a la cual puede transmitir al receptor definida por:

$$\sum_{k=1}^k P_{i,k} \leq P_{max} \quad (5)$$

Donde  $P_{i,k}$  es la potencia dedicada a un receptor  $k$  por parte del transmisor  $i$  y  $P_{max}$  es la potencia de transmisión máxima con la que se puede establecer comunicación entre el transmisor y el receptor, estando esta a su vez relacionada con la máxima potencia que puede recibir un receptor hasta llegar al punto de saturación. Así mismo, se debe tener en cuenta que el canal de comunicación  $h_{i,k}$  tiene una respuesta al impulso diferente en cada uno de ellos y es determinante en el establecimiento de la comunicación entre cada transmisor y cada receptor.

Cada canal de comunicación cuenta con una ganancia que está determinada por  $g = |h_{i,k}|^2$ , definiendo la relación señal a ruido (SINR), como:

$$SINR = \frac{P_{i,k}g_{i,k}}{\zeta_{i,k}} \quad (6)$$

Donde,  $\zeta_{i,k} = \sigma_k^2 + \sum_{j \in i} P_{i,k}g_{i,k}$  y  $\sigma_k^2 = N_0B_s$  son la relación señal a ruido e interferencia calculada como el ruido en el canal más la interferencia causada por los demás transmisores en la red, y el ruido presente en el canal, donde este último se determina a partir de la densidad espectral de potencia de ruido en el ancho de banda del canal. De acuerdo a lo anterior, la función de utilidad escogida para dar solución a este juego está determinada por la siguiente ecuación, la cual cumple con el concepto de convexidad y continuidad de acuerdo a [5].

$$u_i(t) = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_{i,k} |h_{i,k}|^2}{\sigma_{i,k}^2 + \sum_{j \neq i}^K P_{j,k} |h_{j,k}|^2} \right) \quad (7)$$

Donde,  $P_{i,k}$  es la potencia a la cual radia cada transmisor  $i$  sobre el canal  $j$ ,  $|h_{i,j}|^2$  es la ganancia del canal con el cual esta comunicándose el usuario  $i$  con el receptor  $j$ ,  $\sigma_i^2$  es la densidad de ruido presente en el canal ( $h_{i,i}$  o  $h_{i,k}$ ).  $\sum_{j \neq i}^n P_{j,k} |h_{j,k}|^2$  es la suma de los niveles de potencia de los canales adyacentes que interfieren con el canal principal de comunicación entre el usuario y el *access point*.

Sin embargo, la potencia a la cual radia un transmisor es idealmente la potencia máxima del dispositivo inalámbrico. Pero teniendo en cuenta las consideraciones por multiplicidad de usuarios radiando e interfiriendo en el canal, finalmente la potencia  $P_i$  está determinada por la siguiente función de acuerdo a [16],

$$f_i(s_{-i}) = \{s_i \in S_i : u_i(s_i, s_{-i}) \geq \Gamma_i\} \quad (8)$$

Donde  $S_i$  es el conjunto de potencias que hacen parte del conjunto de estrategias de cada usuario y cada una de ellas está definida por la siguiente función [16]:

$$s_i = \left\{ \begin{array}{l} P_i = P_{imax} \left( 10^{\frac{-i}{N-1} \log_{10} N} \right) \\ i \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\} \end{array} \right\} \quad (9)$$

Donde  $N$  es el total de usuarios disponibles en la red inalámbrica y  $P_{imax}$  es la potencia máxima radiada por un dispositivo inalámbrico.

## 2.3 Metodología para la solución del juego

Para dar solución al juego planteado inicialmente, fue necesario comenzar por analizar cada una de las situaciones posibles teniendo en cuenta la cantidad de jugadores (usuarios) y la cantidad de estrategias presentes en el juego. Después de determinar esto, se llevó la realización del siguiente procedimiento:

**2.3.1 Obtención de la Matriz de Utilidades** La matriz de utilidades es una manera de interpretar las utilidades de cada usuario cuando realiza la selección de determinado AP. Para realizar esta matriz se tiene en cuenta el número de jugadores, las estrategias posibles para cada uno de ellos y la ecuación de Shannon como función de utilidad, la cual varía la capacidad de acuerdo a la estrategia seleccionada. En la Tabla 1 se puede ver la utilidad de cada uno de los usuarios de acuerdo a la estrategia seleccionada en determinado instante de tiempo, determinando primero las utilidades del jugador 1 y luego las del jugador 2 en cada caso.

**Tabla 1:** Matriz de utilidades en el juego 2 x 2 en canal interferente.

| Usuario   | Usuario 2     |  |  |
|-----------|---------------|--|--|
|           | Canal 0 AP    | AP1 - Canal 1  | AP2 - Canal 2  |
| Usuario 1 | AP1 - Canal 1 | $C_{11} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 g_{11}}{\sigma^2 + P_2 g_{21}} \right)$  | $C_{11} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 g_{11}}{\sigma^2} \right)$   |
|           |               | $C_{21} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 g_{21}}{\sigma^2 + P_1 g_{11}} \right)$  | $C_{22} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 g_{22}}{\sigma^2} \right)$   |
|           | AP2 - Canal 2 | $C_{12} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 g_{12}}{\sigma^2} \right)$<br>$C_{21} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 g_{21}}{\sigma^2} \right)$ | $C_{12} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 g_{12}}{\sigma^2 + P_2 g_{22}} \right)$<br>$C_{22} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 g_{22}}{\sigma^2 + P_1 g_{12}} \right)$ |

Donde los posibles equilibrios de Nash se definen como:

- Equilibrio 1:  $(AP1, AP1) \Rightarrow$  No es Equilibrio ya que implica que  $P_2 = 0$ .
- Equilibrio 2:  $(AP1, AP2) \Rightarrow$  Equilibrio para  $P_1 = P_2 = P_{max}$ .
- Equilibrio 3:  $(AP2, AP1) \Rightarrow$  Equilibrio para  $P_1 = P_2 = P_{max}$ .
- Equilibrio 4:  $(AP2, AP2) \Rightarrow$  No es Equilibrio ya que implica que  $P_1 = 0$ .

En el caso general *ixk* en efecto un equilibrio de Nash es aquel en el cual todos los usuarios de la red transmiten su máxima potencia, dado que esto permite maximizar su capacidad.

**2.3.2 Algoritmo para la Obtención de los Equilibrios de Satisfacción (ES)** El caso básico es aquel en el cual el jugador intenta encontrar una estrategia pura que satisfaga siempre el umbral de satisfacción definido según el servicio requerido por el usuario. El algoritmo 1 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.

En el algoritmo 1 el contador  $n$  define el número de repeticiones del juego, la función *SeleccionarEstrategia* escoge secuencialmente una estrategia del espacio de estrategias  $\mathbf{s}_i$ , 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. Evidentemente, existirán juegos en los cuales no exista el equilibrio de satisfacción de acuerdo a los umbrales definidos por las necesidades de capacidad de los jugadores y las condiciones de relación señal a ruido e interferencia en el sistema, en este escenario nunca se llegará a un equilibrio.

En el diseño del algoritmo, dado que las restricciones de calidad del servicio pueden escribirse como  $f_k(s_{-k}) = \{s_k \in S_k : u_k(s_k, \mathbf{s}_{-k}) \geq \Gamma_k\}$  donde  $\Gamma_k$  es el mínimo nivel de utilidad requerido por el jugador  $k$ , y asumiendo que los jugadores conocen su propio conjunto de acciones y

periódicamente observan la utilidad alcanzada, e indexando los elementos del conjunto  $\mathbf{S}_k$  con índice  $n_k \in N_k \equiv \{1, 2, \dots, |S_k|\}$  en cualquier orden particular, luego denotando como  $s_k(n_k)$  la  $n_k$ -ésima acción del jugador  $k$ , luego:

1. Al inicio del juego, todos los jugadores  $k \in K$  establecen su acción inicial  $s_k(1)$ .
2. Cada jugador  $k \in K$ , verifica si la utilidad obtenida  $u_i$  al jugar la acción seleccionada supera el umbral  $\Gamma_k$ , de ser así, el jugador actúa de acuerdo a la acción seleccionada y permanece indiferente ante las acciones de los demás jugadores, dado que se satisface su umbral; en caso contrario selecciona como nueva acción la acción correspondiente al siguiente índice ( $n_k = n_{k+1}$ ) en el conjunto  $\mathbf{S}_k$ .
3. Si no se converge a una solución del juego, se retorna al paso 2.

De acuerdo al proceso descrito anteriormente, el algoritmo que implementa los pasos definidos es el siguiente:

---

**Algoritmo 1 ES:** Equilibrio Satisfacción

---

```

1: función:ES(umbral,n)
2: si  $\leftarrow$  seleccionar estrategia
3: Para:i=1 hasta n
4:   juegue  $s_i$  y observe resultado
5:   Si  $f_k(s - k) \leq \Gamma_k$  luego
6:      $s_i \leftarrow$  seleccionar estrategia
7:   Fin Si
8: Fin para
9: Retornar  $s_i$ 
    
```

---

Para analizar el resultado referente a la convergencia del algoritmo 1 se define la acción de corte [16] como:

**Definición 3 (Acción de Corte):**

En el juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{f_k\}_{k \in K}\}$  un jugador  $k \in K$  se dice que tiene una acción de corte  $s_k$  si y solamente si

$$\forall \mathbf{s}_{-\mathbf{k}} \in \mathbf{S}_{-\mathbf{k}}, s_k \in f_k(\mathbf{s}_{-\mathbf{k}}) \quad (10)$$

Una vez un jugador juega su acción de corte, éste permanece indiferente a las acciones realizadas por todos los demás jugadores, dado que el jugador siempre satisface sus requerimientos al jugar dicha acción.

**Proposición 2 (No convergencia del Algoritmo 1):** Asumiendo la existencia de al menos un jugador con una acción de corte en el juego  $G = \{K, \{s_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{f_k\}_{k \in K}\}$  y denotada por  $s_k \in \mathbf{S}_{\mathbf{k}}$  para el jugador  $k \in K$ ; luego si existe un jugador  $j \in K$ , para el cual  $f_j(s_k, s_{-\{j,k\}}) = \emptyset$ ,  $\forall \mathbf{s}_{-\{j,k\}} \in \mathbf{S}_{-\{j,k\}}$ . Luego el algoritmo 1 no converge a un equilibrio de satisfacción.

La prueba de la proposición 2, proviene del hecho de que en un tiempo  $t$  anterior a la convergencia, la probabilidad de la acción de corte  $s_k$  es mayor que cero, por lo tanto el jugador  $k \in K$  puede jugar esta acción. Si es así, por definición, no existe un jugador  $j \neq k$ , que nunca satisface sus requerimientos; por lo tanto el algoritmo 1 no converge a ningún equilibrio de satisfacción. En caso contrario, si ninguno de los jugadores tiene una acción de corte, el algoritmo 1 converge a un equilibrio de satisfacción con una probabilidad de uno. Este resultado viene del hecho de que, en ausencia de acciones de corte, siempre existe una probabilidad no cero de visitar todos los posibles perfiles de acción. Una vez que un perfil de acción corresponde a un equilibrio de satisfacción es visitado, ninguno de los jugadores cambia su acción, y se observa la convergencia. Es de anotar que el algoritmo 1 aplica para cualquier escenario  $ixk$  y no solo de manera simplificada como el escenario  $2x2$  para el cual se obtuvo el equilibrio de Nash.

### 3 Resultados

Para evaluar cada una de las ecuaciones obtenidas en la matriz de utilidades, teniendo en cuenta los criterios tomados para cada una de las variables que intervienen en la ecuación de capacidad de *Shannon* para cada usuario, considerando las posibles estrategias de potencias de transmisión disponibles para cada uno, de acuerdo con las características del canal presentadas en ese instante de tiempo, es decir que hubiera o no interferencia entre los

canales de los AP seleccionados por cada usuario.

La idea principal de este algoritmo es obtener una región de capacidades que cumplan con los conceptos de solución propuesto para el juego, es decir encontrar los equilibrios de satisfacción. El procedimiento realizado para ello fue obtener una región de capacidad total, y a partir de esta última región obtener los equilibrios de satisfacción (SE) para cada caso.

Por lo tanto, para visualizar y comprender de una mejor manera los resultados obtenidos, estos se dividieron en dos casos:

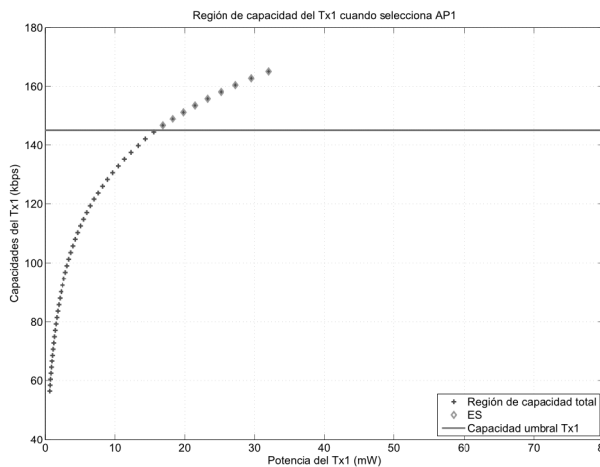
**Caso 1 sin interferencia entre canales:** Para obtener la región de equilibrios de satisfacción se realizó una comparación de cada una de las capacidades obtenidas en la región total para determinar dentro de esta región cuales satisfacían y eran superiores a la capacidad umbral. Para este caso en particular, la capacidad umbral se estableció por criterio en  $\Gamma = (145, 85)\text{kbps}$ , donde se indican arbitrariamente las capacidades umbral definidas para el usuario 1 y 2 respectivamente. Estos valores se determinaron de acuerdo a las actividades que mayor tasa de transferencia de información requieren en una red, como lo es realizar una videollamada o descargar un video.

- Para el usuario 1:  $C_{SE} \geq \Gamma_1 = 145\text{kbps}$
- Para el usuario 2:  $C_{SE} \geq \Gamma_2 = 85\text{kbps}$

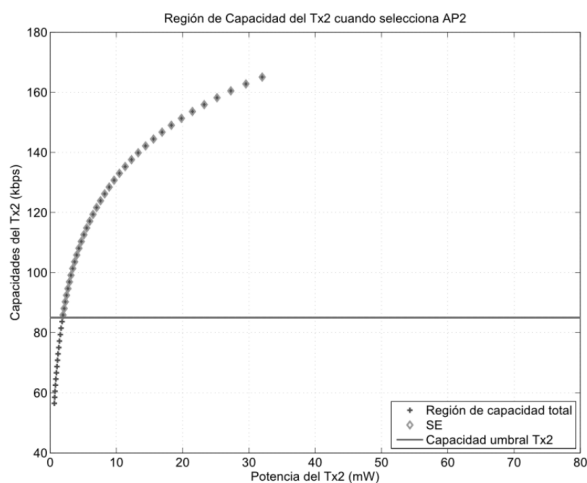
Dentro de este escenario, se pueden presentar dos situaciones en las cuales no se presenta interferencia entre canales de acuerdo a las elecciones que puede realizar en un instante de tiempo cada uno de los usuarios, es decir elegir AP diferentes. Las dos situaciones son las siguientes:

1. Que el usuario 1 acceda al AP1 y el usuario 2 acceda al AP2.
2. Que el usuario 1 acceda al AP2 y el usuario 2 acceda al AP1.

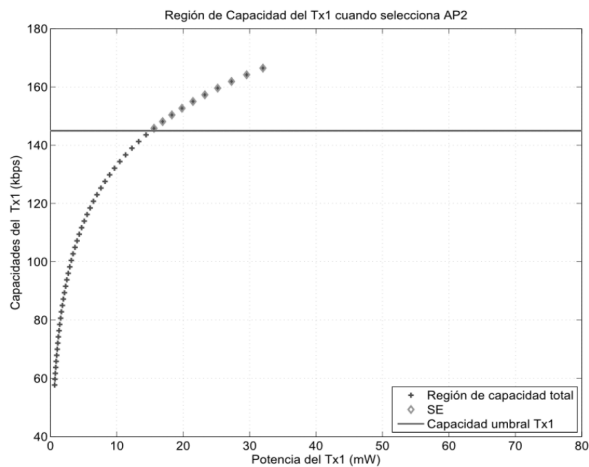
En las Figuras 2 y 3, se pueden visualizar las capacidades obtenidas para la situación 1 y en las Figuras 4 y 5 para la situación 2.



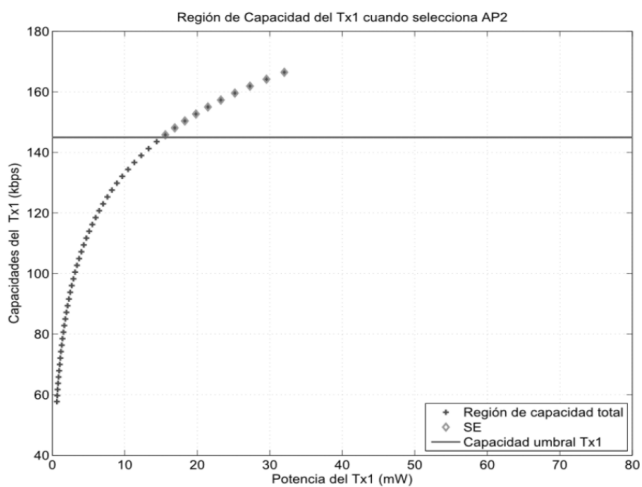
**Figura 2:** Región de SE del transmisor 1 cuando selecciona AP1 para el escenario sin interferencia para una  $\Gamma = (145, 85) \text{ kbps}$ .



**Figura 3:** Región de SE del transmisor 2 cuando selecciona AP2 para el escenario sin interferencia para una  $\Gamma = (145, 85) \text{ kbps}$ .



**Figura 4:** Región de SE del transmisor 1 cuando selecciona AP2 para el escenario sin interferencia para una  $\Gamma = (145, 85) \text{ kbps}$ .



**Figura 5:** Región de SE del transmisor 2 cuando selecciona AP1 para el escenario sin interferencia para una  $\Gamma = (145, 85) \text{ kbps}$ .

En este escenario libre de interferencia se puede apreciar con cruces la capacidad del sistema y como en la medida que se incrementa la potencia de transmisión, se incrementa la capacidad; con rombos, se observan los equilibrios de Satisfacción para cada uno de los usuarios operando en este escenario; en las Figuras 2,3,4 y 5, se aprecia como el equilibrio de satisfacción para los usuarios se alcanza cuando cada usuario radia una potencia tal que le permite superar la capacidad umbral definida para el respectivo usuario; adicionalmente, se observa en línea continua la capacidad umbral  $\Gamma$  definida de forma arbitraria de tal manera que represente la capacidad requerida por un servicio particular de usuario en el escenario ilustrado; por consiguiente en las gráficas puede apreciarse que efectivamente para este escenario se alcanza y supera la capacidad umbral  $\Gamma$  definida para el servicio de usuario, permitiendo evidenciar que cuando cada usuario transmite una potencia lo suficientemente alta satisface el umbral definido por la aplicación, por lo tanto se garantiza alcanzar y en general superar la capacidad requerida y por consiguiente llegar a un equilibrio en el juego.

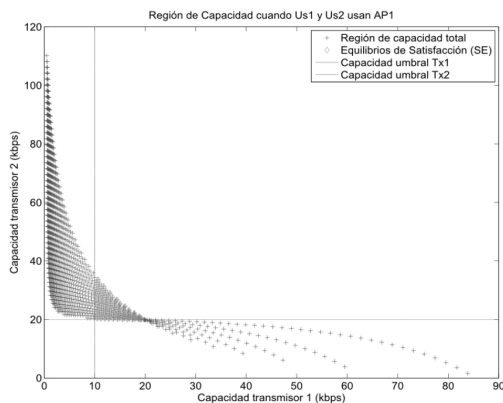
**Caso 2 con interferencia entre canales:** Al igual que en el caso anterior, los equilibrios de satisfacción y los equilibrios de satisfacción eficientes se calcularon a partir de la región total obtenida a partir de la ecuación 5, teniendo en cuenta que en este escenario ya hay señales de interferencia causadas por otros usuarios que están utilizando el mismo AP. Pero para este caso particular, se tomó como capacidad umbral  $\Gamma = (10, 20)kbps$ . En este escenario las capacidades obtenidas se reducen notablemente debido a que las señales de interferencia aumentan el nivel de potencia de ruido, lo cual hace que la capacidad disminuya, afectando de cierta manera los niveles de las capacidades umbrales para cada uno de los usuarios. Este valor de tasas de transferencia pueden hacer alusión a casos donde cada uno de ellos simplemente están accediendo a ver una página web, o una descarga de un documento o de un archivo que sea de un tamaño mínimo. Entonces a partir de estos valores se obtiene que:

- Para el usuario 1:  $C_{SE} \geq \Gamma_1 = 10kbps$
- Para el usuario 2:  $C_{SE} \geq \Gamma_2 = 20kbps$

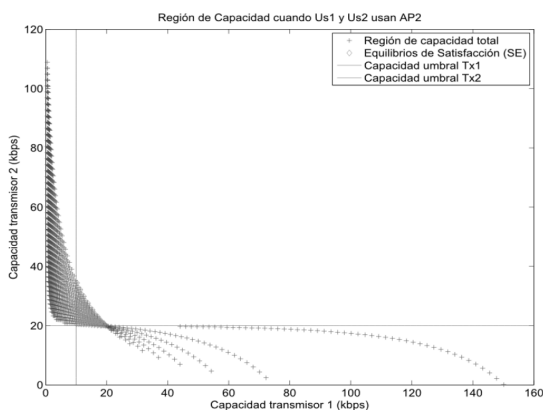
Para este caso, las dos situaciones que se pueden presentar son las siguientes:

1. Que el usuario 1 y el usuario 2 accedan al AP1.
2. Que el usuario 1 y el usuario 2 accedan al AP2.

Por lo tanto, las Figuras 6 y 7 muestran los resultados correspondientes a cada una de las dos situaciones anteriormente mencionadas.



**Figura 6:** Región de SE del transmisor 1 y 2 cuando seleccionan el AP1 para el escenario con interferencia para una  $\Gamma = (10, 20)$  kbps.



**Figura 7:** Región de SE del transmisor 1 y 2 cuando seleccionan el AP2 para el escenario con interferencia para una  $\Gamma = (10, 20)$  kbps.

Al igual que en el caso anterior, en este escenario con interferencia se puede apreciar con cruces la capacidad del sistema, con rombos se observan los equilibrios de Satisfacción para cada uno de los usuarios operando en este escenario y, en línea continua, las capacidades umbral  $\Gamma$  definida de forma arbitraria de tal manera que represente la capacidad requerida por un servicio particular de cada usuario en el escenario ilustrado. En este caso en las Figuras 6 y 7 se aprecia que la capacidad no crece permanentemente en la medida en que se incrementa la potencia de transmisión del usuario. Se puede apreciar que existe un punto en el cual la interferencia en el sistema, causada por el usuario interferente afecta la capacidad de cada usuario, al punto que esta capacidad tiende nuevamente a cero en la medida que la potencia de transmisión de cada usuario tiende a ser máxima; es por ello que se aprecia que cada usuario maximiza su capacidad individual cuando transmite a máxima potencia pero cuando el otro usuario no transmite, situación que no es realista dada la premisa bajo la cual los dos usuarios requieren garantizar una capacidad umbral  $\Gamma$ , por consiguiente requieren transmitir con una potencia diferente de cero. Por ello se aprecia que los equilibrios de satisfacción aplicables al escenario real son aquellos que aparecen graficados con rombos, los cuales garantizan alcanzar la capacidad umbral requerida por el servicio de cada usuario.

## 4 Conclusiones

En este artículo se presenta como resultado un algoritmo capaz de realizar la selección de *access point* inalámbrico considerando satisfacer la capacidad umbral requerida por cada uno de los usuarios conocida como equilibrios de satisfacción. Para cada uno de los casos, se obtiene una región de capacidades diferentes, es decir para el caso sin interferencia se obtienen valores de capacidades más altas comparadas con las obtenidas en el caso con interferencia entre canales. Por lo tanto, el escenario que mayor utilidad brinda a un usuario es cuando este accede a un AP donde él sea el único usuario, pero a medida que se incrementan el número de usuarios que utilizan el mismo AP, la capacidad disponible en este, se comienza a distribuir entre todos los usuarios. Por esta razón, se presenta una disminución en las capacidades obtenidas por cada uno de ellos.

En el modelo propuesto, se observa que el problema de selección de

*access point* inalámbrico en redes 802.11 bajo la consideración de operación de cada *access point* sobre una única portadora, puede abordarse como un problema de selección de canal, donde cada usuario inalámbrico realizará la selección del *access point* (canal) en función de la ganancia del canal percibida por él mismo y por los demás usuarios.

La pertinencia práctica sobre la aplicación del concepto de equilibrio de satisfacción se evidencia claramente en este artículo, donde se ilustra su aplicabilidad en el desarrollo de algoritmos como el propuesto, donde bajo condiciones restringidas y de calidad de servicio basada en capacidad, se soluciona el problema de la selección de *access point* inalámbrico en redes 802.11. Sin embargo, varios problemas siguen sin resolverse. En primer lugar, un algoritmo general para la convergencia a una SE es aún desconocido, el algoritmo propuesto es un algoritmo particular para el escenario propuesto en el modelo basado en restricciones. De otro lado, siempre que la red pueda satisfacer los requisitos de QoS, el enfoque planteado ofrece una solución, sin embargo, en el caso contrario, un enfoque en estrategias mixtas se puede utilizar para satisfacer al menos en la expectativa los requisitos de QoS.

Este trabajo presenta un gran aporte para trabajos en los cuales no solo se tome como señales de interferencia la señal proveniente de los usuarios que estén accediendo al mismo AP, sino que se tengan en cuenta señales interferentes provenientes de otras tecnologías y/o redes que operen bajo la misma banda de frecuencia. Así mismo, para analizar protocolos de redes 802.11 donde el ancho de banda no sea estático sino que sea dinámico y así mismo analizar la influencia de estos cambios en la capacidad para transferir datos en una red.

## 5 Agradecimientos

Al Grupo de Investigación de la Universidad del Quindío - GITUQ por su valioso aporte en la consecución de bibliografía y recursos disponibles para la realización de este trabajo. Igualmente los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad del Quindío por la financiación del proyecto con código: 599.

## Referencias

- [1] J. Nash, “Equilibrium points in n-person games,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 36, no. 1, pp. 48–49, 1950. [Online]. Available: <http://www.pnas.org/content/36/1/48> 116, 118, 119
- [2] S. Ross and B. Chaib-draa, “Satisfaction equilibrium : Achieving cooperation in incomplete information Games,” *AI’06 Proceedings of the 19th international conference on Advances in Artificial Intelligence: Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, pp. 61–72, 2006. [Online]. Available: [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11766247\\_6](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11766247_6) 116, 118
- [3] B. B. Chun, R. Fonseca, I. Stoica, and Kubiawicz, “Characterizing Selfishly Constructed Overlay Routing Networks,” *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp. 1329–1339, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/INFCOM.2004.1357018> 117
- [4] A. Fabrikant, A. Luthra, E. Maneva, C. Papadimitriou, and S. Shenker, “On a Network Creation Game,” *PODC ’03 Proceedings of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing*, pp. 347–351, 2003. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/872035.872088> 117
- [5] M. Mavronikolas and P. Spirakis, “The Price of Selfish Routing,” *STOC ’01 Proceedings of the thirty-third annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 510–519, 2001. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/380752.380846> 117, 123
- [6] L. Qiu, Y. Yang, Y. Zhang, and S. Shenker, “On Selfish Routing in Internet-Like Environments,” *SIGCOMM ’03 Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 151–162, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/863955.863974> 117
- [7] T. Roughgarden and E. Tardos, “How Bad is Selfish Routing?” *Foundations of Computer Science, 2000. Proceedings. 41st Annual Symposium on*, pp. 93–102, 2000. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/SFCS.2000.892069> 117
- [8] A. Akella, S. Seshan, R. Karp, S. Shenker, and C. Papadimitriou, “Selfish Behavior and Stability of the Internet: A Game-Theoretic Analysis of TCP,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, pp. 117–130, 2002. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/633025.633037> 117

- [9] L. Anderegg and S. Eidenbenz, “Ad-hoc VCG: a Truthful and Cost-Efficient Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks with Selfish Agents,” *MobiCom '03 Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 245–259, 2003. [Online]. Available: <http://goo.gl/5Ji1Oe> 117
- [10] W. Wang, X. Li, and Y. Wang, “Truthful Multicast Routing in Selfish Wireless Networks,” *MobiCom '04 Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 245–259, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/1023720.1023745> 117
- [11] V. Eidenbenz S ND Kumar and S. Zust, “Equilibria in Topology Control Games for Ad hoc Networks,” *DIALM-POMC '03 Proceedings of the 2003 joint workshop on Foundations of mobile computing*, pp. 2–11, 2003. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/941079.941081> 117
- [12] C. Saraydar, N. Mandayam, and D. Goodman, “Efficient Power Control via Pricing in Wireless Data Networks,” *IEEE Transactions on Communication*, vol. 50, no. 2, pp. 291–303, 2002. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/26.983324> 117
- [13] V. Srinivasan, P. Nuggehalli, C. Chiasserini, and R. Rao, “Co-operation in Wireless Ad Hoc Networks,” *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, vol. 2, pp. 808 – 817, 2003. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/INFCOM.2003.1208918> 117
- [14] J. Musacchio and J. Walrand, “WiFi Access Point Pricing as a Dynamic Game,” *Proceedings Seventh INFORMS Telecommunications Conference*, pp. 1–3, 2004. [Online]. Available: [http://users.soe.ucsc.edu/~johnm/Publications/Informs\\_WiFi.pdf](http://users.soe.ucsc.edu/~johnm/Publications/Informs_WiFi.pdf) 117
- [15] R. K. Lam, D. M. Chiu, and J. C. S. Lui, “On the Access Pricing and Network Scaling Issues of Wireless Mesh Networks,” *ICDCS '06 Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, p. 61, 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICDCS.2006.60> 117
- [16] —, “On the Access Pricing and Network Scaling Issues of Wireless Mesh Networks,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 56, no. 11, pp. 1456–1469, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TC.2007.70753> 117, 120, 123, 126
- [17] K. Mittal, E. Belding, and S. Suri, “A Game Theoretic Analysis of Wireless Access Point Selection by Mobile Users,” *Journal Computer*

- Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2049–2062, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014036640800025X> 117
- [18] S. Perlaza, H. Tembine, S. Lasaulce, and M. Debbah, “Satisfaction equilibrium: A general framework for QoS provisioning in self configuration networks,” *CoRR*, vol. abs/1007.5, 2010. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1007.5170v1> 117
- [19] S. Perlaza, E. Belmega, S. Lasaulce, and M. Debbah, “On the base station selection and base station sharing in self-configuring networks,” *VALUETOOLS '09 Proceedings of the Fourth International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, 2009. [Online]. Available: <http://eudl.eu/doi/10.4108/ICST.VALUETOOLS2009.7778> 117
- [20] R. Ciria, *Estudio de estrategias distribuidas de reparto de recursos en redes inalámbricas cognitivas mediante teoría de juegos*. Universidad de Zaragoza, 2011. 117
- [21] J. Pérez, J. L. Jimeno, and E. Cerda, *Teoría de juegos*. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2004. 120
- [22] T. Cover and J. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2006. 122