

Document downloaded from the institutional repository of the University of Alcalá: <http://dspace.uah.es/dspace/>

This is a postprint version of the following published document:

Hoz, E. de la, Gimenez-Guzman, J.M., Marsa-Maestre, I., Orden Martín, D. 2015, "Uso de técnicas de negociación automática para la asignación de canales en IEEE 802.11," XII Jornadas de Innovación Educativa (JIE 2015), Maria Magdalena Payeras Capellà, Jaume Ramis Bibiloni , eds., Universitat de les Illes Balears. P. 239-246.

Available at <http://jitel15.uib.es/>

Copyright 2015 Los Autores



(Article begins on next page)

This work is licensed under a
Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives
4.0 International License.

Uso de técnicas de negociación automática para la asignación de canales en IEEE 802.11

Enrique de la Hoz¹, Jose Manuel Gimenez-Guzman¹, Ivan Marsa-Maestre¹ y David Orden Martín²

¹ Departamento de Automática

² Departamento de Física y Matemáticas

Universidad de Alcalá

Edificio Politécnico, Campus Universitario, 28805 Alcalá de Henares, Madrid.

{enrique.delahoz, josem.gimenez, ivan.marsa, david.orden}@uah.es

Resumen—Las redes inalámbricas actuales deben dar soporte a cada vez más servicios telemáticos que demandan mayores prestaciones. Puesto que el espectro radioeléctrico en el que estas redes se basan es limitado, aumentar su eficiencia es ya una exigencia. En este trabajo se aborda el problema de la asignación de canales a puntos de acceso IEEE 802.11n con el objetivo de que los clientes de la red vean mejorada su experiencia de utilización. Las técnicas que se emplean con tal objetivo se basan en la negociación automática, comparándose con otras alternativas. Los resultados muestran que las técnicas de negociación son muy adecuadas para resolver el problema en cuestión, siendo capaces de obtener prestaciones superiores al resto de métodos con los que se han comparado.

Palabras Clave—Redes inalámbricas, IEEE 802.11n, negociación automática, asignación de canales.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de las telecomunicaciones, el recurso máspreciado por su escasez actual es el espectro radioeléctrico. Muchos son los motivos para esta escasez. En primer lugar, cada vez son más las tecnologías que requieren usar el espectro radioeléctrico y, además, en los mismos lugares. Por otro lado, el número de usuarios que hace uso de las mismas está sufriendo un vertiginoso aumento en la última década. Además, los usuarios cada vez requieren un mayor ancho de banda de las redes inalámbricas que emplean, de manera que cada vez es más difícil que las redes de comunicaciones inalámbricas sean capaces de ofrecer servicios telemáticos solventemente y con ciertas garantías de servicio. Por lo tanto, se puede concluir que es una necesidad real el hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Muchas son las soluciones que se están dando al problema de la escasez del espectro radioeléctrico a todos los niveles. Entre estas soluciones encontramos algunas basadas en mejorar la eficiencia espectral [1] y los algoritmos de detección y corrección de errores [2] o en diseñar nuevas antenas que permitan aprovechar la propagación multicamino para recibir señales de una manera más eficiente (MIMO) [3]. Otras se centran en, para una determinada tecnología, encontrar mecanismos de coordinación para los dispositivos que conviven en la misma banda de frecuencia, de forma que se minimicen las interferencias y se aumente el rendimiento. Es lo que se conoce como problema de la asignación de frecuencias, o *frequency assignment problem (FAP)* [4]. La asignación de frecuencias se ha abordado de forma centralizada desde la perspectiva de optimización [5], y desde la ingeniería con heurísticas distribuidas. Entre esas heurísticas, probablemente una de las más ampliamente desplegada sea LCCS (*Least*

Congested Channel Search) [6], que es la que se utiliza en las redes IEEE 802.11. De hecho, la asignación de canales en IEEE 802.11 constituye un subconjunto interesante de los problemas FAP, dada la ubicuidad de este tipo de redes y el crecimiento exponencial del número de dispositivos que las emplean en los últimos años.

En este artículo se pretende abordar el problema de la asignación de frecuencias (canales) en redes IEEE 802.11 desde la perspectiva de las técnicas de negociación automática. La negociación automática ha demostrado ser eficaz para el apoyo a la toma de decisiones en escenarios donde es necesario llegar a acuerdos de forma rápida y conciliando intereses en conflicto [7]. Las potenciales aplicaciones de la negociación automática van desde el comercio electrónico [8] a la resolución de problemas complejos de distribución de tareas, compartición de recursos o diseño cooperativo [9], [10], [11], [12]. Una de las ventajas de la negociación automática es que tiene en cuenta el conflicto de intereses desde el principio, lo que permite llegar a soluciones (acuerdos) más estables y menos proclives a que los agentes implicados (por ejemplo, los usuarios de los puntos de acceso IEEE 802.11 en un determinado edificio) decidan desviarse de la solución socialmente óptima en favor de otra que maximice su utilidad individual.

En particular, este artículo pretende contrastar la hipótesis de que las técnicas de negociación no lineal, en las que los autores han trabajado de forma extensiva [13], [14], pueden ser aplicadas al escenario concreto de la asignación de canales en IEEE 802.11. Este trabajo contribuye a este objetivo en las siguientes formas:

- Presentamos un modelado abstracto del problema inspirado en el problema matemático del coloreado de grafos (Sección II-A).
- Planteamos un modelo de utilidad de las asignaciones de frecuencia que tiene en cuenta la influencia de la interferencia entre los diferentes canales IEEE 802.11 en la relación señal a ruido de un receptor en un momento dado (Sección II-D).
- Realizamos una primera aproximación al problema de asignación de frecuencias en IEEE 802.11 desde la perspectiva de la negociación, en un escenario con dos proveedores de servicio (Sección III).

Para validar la hipótesis de partida y valorar el efecto de nuestras contribuciones, se ha realizado un conjunto de experimentos, que se describen y analizan en la Sección IV.

Finalmente, el artículo concluye con una discusión de los resultados obtenidos y el planteamiento de líneas futuras de trabajo.

II. MODELADO DEL PROBLEMA

A. Modelado abstracto basado en coloreado de grafos

Los grafos se encuentran entre las herramientas más utilizadas para modelar el problema de asignación de frecuencias, debido a la relación de este problema con el de coloreado de grafos, ampliamente estudiado en la comunidad matemática [15]. En el coloreado de grafos se considera un grafo abstracto, dado como un conjunto de vértices junto con ciertas aristas entre ellos, y se tiene por objetivo asignar un color a cada vértice de modo que se utilice el menor número posible de colores evitando las aristas monocromáticas.

En el modelo utilizado habitualmente, los nodos del grafo representan elementos a los que se debe asignar una frecuencia y las aristas representan aquellos pares de elementos que no deben recibir la misma frecuencia. De este modo, los colores juegan el papel de las frecuencias y las aristas heterocromáticas aseguran pares de elementos con frecuencias distintas.

Pese a lo extendido de este modelo, Tragos et al. [16] concluyen que resulta insuficiente, puesto que no refleja toda la información. Por ejemplo, sugieren que se debería incorporar al grafo la información correspondiente a interferencias entre canales adyacentes. En esta línea, el presente trabajo propone la utilización de un grafo que modela con más fidelidad el problema.

Como elementos del grafo, distinguimos dos tipos de vértices y dos tipos de aristas. En cuanto a los vértices, consideramos puntos de acceso (AP) y clientes (C). En cuanto a las aristas, por un lado cada cliente está unido a su AP más cercano (con el fin de reflejar que dicho cliente utilizará el canal que se asigne a su AP más cercano) y por otro lado uniremos también algunos pares de nodos cuando la distancia entre ellos sea menor que el correspondiente radio de interferencia R (para reflejar las interferencias): los pares de tipo AP-AP se unirán siempre que se cumpla esa condición de distancia, los pares de tipo AP-C solo cuando el cliente no esté asociado a ese AP, y los pares de tipo C-C solo cuando ambos clientes estén asociados a distintos APs.

Además, con el fin de modelar la potencia de la interferencia entre dos elementos, asignamos un peso a cada arista basándonos en tres factores. En primer lugar, consideramos un peso para cada par de colores ij , que puede interpretarse como la interferencia entre el color i y el color j . Es interesante destacar que el problema usual de coloreado solo considera el caso particular de interferencias entre pares de vértices con el mismo color, mientras que nuestra extensión del problema permite considerar también interferencias entre colores adyacentes o en un cierto rango de distancias.

En segundo lugar modulamos los pesos anteriores, considerando la distancia entre los extremos de las aristas. De este modo, el peso de una arista coloreada ij será diferente dependiendo de cómo de cercanos estén sus extremos. Esto supone una nueva extensión del problema usual de coloreado, puesto que ahora los vértices tienen unas posiciones concretas y eso hace que nuestro grafo pase a ser geométrico en lugar de abstracto.

En tercer lugar introducimos en los pesos el efecto del tiempo, considerando que los vértices alternan intervalos en que se encuentran activos con otros intervalos de tiempo en los que están inactivos y por tanto no afectan al coloreado. En la siguiente sección se describe cómo se tienen en cuenta los efectos de los tres factores citados sobre el escenario de redes IEEE 802.11n.

B. Efectos de la propagación en la cobertura

Para poder evaluar un determinado coloreado de un escenario IEEE 802.11 se debe incorporar y modelar el efecto que tienen sobre las señales tanto la propagación como las interferencias. Para el modelo de propagación, en [17] se define que las pérdidas de potencia de la señal de radiofrecuencia, expresadas en dB y considerando que las antenas están próximas al suelo (entre 1 y 2.5m), pueden calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$P_{loss} = 40\log_{10}d + 20\log_{10}f - 20\log_{10}(h_t h_r), \quad (1)$$

donde d es la distancia expresada en metros, f es la frecuencia de la señal expresada en GHz y h_t (h_r) es la altura de la antena de transmisión (recepción), también expresada en metros. La Ec. 1 puede simplificarse para su uso en la banda de frecuencias de 2.4 GHz, empleada por IEEE 802.11b/g/n, obteniéndose:

$$P_{loss} = 7.6 + 40\log_{10}d - 20\log_{10}(h_t h_r). \quad (2)$$

Un caso particular especialmente interesante del modelo de propagación empleado es el relativo al caso límite que supone recibir una señal con una potencia igual a la sensibilidad del receptor, es decir:

$$P_t + G_t + G_r - L - P_{loss} = S, \quad (3)$$

donde P_t representa la potencia de transmisión (en dBm), G_t (G_r) representa la ganancia de la antena de transmisión (recepción) (en dB), L representa las pérdidas debidas a paredes, ventanas y obstáculos en la propagación (en dB), P_{loss} representa las pérdidas por la propagación (en dB) y S es la sensibilidad del receptor (en dBm). Si empleamos la Ec. 2 podremos conocer la distancia a partir de la cual las señales no pueden ser percibidas por el receptor. Dicha distancia (expresada en metros) puede calcularse como:

$$R = 10^{\frac{P_t + G_t + G_r - L - S - 7.6 + 20\log_{10}(h_t h_r)}{40}}. \quad (4)$$

El interés del cálculo de R según la Ec. 4 reside en que dicha distancia constituirá la distancia máxima a la que puedan estar dos nodos para que se conecten en el grafo de interferencias.

C. Efectos de las interferencias

Para ser capaces de cuantificar la calidad de la señal recibida se deben considerar las señales interferentes (interferencias), entendidas estas como las señales no deseadas que reciben los diferentes elementos de la red y que dificultan la correcta recepción de la señal deseada. Así, para el problema en cuestión, es necesario cuantificar la potencia de las señales interferentes en todos los puntos de recepción de señal, es decir, tanto en los terminales como en los APs. En primer lugar, para modelar dichas interferencias hay que recordar que se

ha asumido que solo existen interferencias de otros emisores IEEE 802.11, no considerando otras posibles interferencias de otras tecnologías que operen en la banda de frecuencias de 2.4GHz. No sería complejo añadir dichas interferencias al modelo que se va a describir a continuación, pero no se han incluido porque su aparición es ajena al problema que se trata en este artículo. Por otro lado, puesto que la distancia es un parámetro básico en la propagación también de señales interferentes, se han despreciado las interferencias que provienen de fuentes que se encuentran lejos del punto de recepción, de manera que la sensibilidad del receptor no alcance a recibirlas, siguiendo el grafo de interferencia que se ha descrito en la Sección II-A. Finalmente, se ha asumido que los terminales conectados a un mismo AP no interfieren entre sí, puesto que dichas comunicaciones están coordinadas por el AP.

En cada nodo, la calidad de la señal recibida depende de todas las interferencias recibidas, las cuales han sido transmitidas por otros APs y terminales. Además de la distancia (que influye en las pérdidas de la señal, Ec. 2), las interferencias también resultan afectadas por otros dos factores: el índice de actividad (Ψ) y el índice cocanal (δ). El índice de actividad representa la fracción del tiempo en que una señal interferente se está recibiendo respecto al tiempo total. Dicho índice modela el hecho de que resultará más perjudicial una señal interferente que se emita el 60% del tiempo que otra que se emite el 10% del tiempo. En concreto, se han considerado dos índices de actividad diferentes: para los APs (Ψ_{AP}) y para los terminales (Ψ_T). Puesto que el tráfico de Internet es mayoritariamente asimétrico en sentido *downstream*, se ha considerado que $\Psi_{AP} > \Psi_T$, en concreto se ha usado $\Psi_{AP} = 0,5$ y $\Psi_T = 0,2$. Esta elección se ha hecho para considerar la asimetría del tráfico, si bien sus valores absolutos dependerán de factores muy variables como la aplicación o la hora del día. Por otro lado, el índice cocanal (δ) representa el solape existente entre las diferentes bandas de frecuencia empleadas por la tecnología IEEE 802.11 cuando esta opera en la banda de 2.4GHz. Para la inclusión de este efecto, se han empleado los valores medidos para este índice para IEEE 802.11n en [18], donde se muestra una matriz en la que cada valor (i, j) representa la interferencia en el canal i que produce una transmisión en el canal j . Sintetizando lo expuesto, si un nodo que opera en el canal i recibe la interferencia de un nodo que opera en el canal j , la potencia de dicha interferencia viene dada por:

$$I = P_t + G_t + G_r - L - P_{loss} + \delta(i, j) + \Psi, \quad (5)$$

donde todos los valores se expresan en dB, incluido Ψ , que será Ψ_{AP} o Ψ_T si la señal interferente proviene de un AP o terminal cliente, respectivamente. Una vez conocido el modelado de las señales interferentes, se puede determinar la relación señal a ruido en cada terminal ($SINR_i$, para el terminal i -ésimo) como el cociente entre la señal recibida y la suma de las interferencias recibidas. Nótese que cada AP tendrá un valor de $SINR$ para cada uno de los terminales con los que esté conectado. En este caso, se ha considerado que su $SINR$ será el menor de todos ellos, es decir, el peor de los casos.

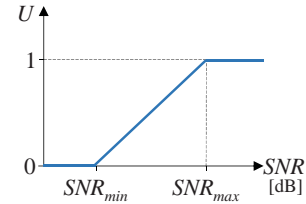


Fig. 1. Relación entre la utilidad y $SINR$.

D. Utilidad de las soluciones

Para cuantificar la bondad de los diferentes coloreados de la red realizados, se ha empleado el concepto de utilidad, el cual está muy directamente relacionado con la $SINR$ y el régimen binario alcanzado [19].

Así, la utilidad que percibe el nodo i -ésimo (U_i) es un valor entre 0 y 1, siendo 0 el caso en el que la recepción es de baja calidad y el terminal (AP) no se mantiene constantemente conectado con su AP (terminal). Por otro lado, el caso en el que $U_i = 1$ se dará cuando la calidad de la señal es excelente. La relación entre la utilidad y la $SINR$ se puede observar en la Fig. 1.

Para definir los valores umbrales de $SINR$ que definen el máximo y el mínimo de la utilidad, se han empleado los valores medidos en [20], siendo estos $SINR_{min} = 10dB$ y $SINR_{max} = 40dB$.

Finalmente, la utilidad de un coloreado específico de la red se calcula como la suma de las utilidades de todos los nodos que componen dicha red, es decir:

$$U = \sum_{\forall i} U_i. \quad (6)$$

III. TÉCNICAS DE NEGOCIACIÓN AUTOMÁTICA PARA LA SELECCIÓN DE CANALES

Tal y como apuntábamos en la introducción, en este artículo nos planteamos abordar el problema de la asignación de frecuencias en IEEE 802.11 desde la perspectiva de la negociación automática. Aunque la negociación automática es un campo de gran diversidad, para el contexto de este artículo podemos considerar un problema típico de negociación, donde existe un dominio de la negociación (quién negocia, y sobre qué se negocia), un protocolo de interacción (con qué reglas se resuelve el proceso de negociación), y un conjunto de mecanismos de decisión o *estrategias* que guían a cada uno de los agentes implicados en la negociación a lo largo de cada una de las fases del protocolo de interacción [21].

A. Dominio de la negociación

Para el alcance de este trabajo, vamos a asumir un dominio de negociación multiatributo, donde un acuerdo o solución al problema se define como un conjunto de atributos (*issues*), cada uno de los cuales puede tomar un valor dentro de un determinado rango. En nuestro caso, en un problema de asignación de canales para n_{AP} puntos de acceso, una solución o acuerdo S vendría dada por $S = \{s_i | i \in 1, \dots, n_{AP}\}$, donde cada $s_i \in [1, 11]$ representa la asignación de un canal IEEE 802.11 al punto de acceso i . Aunque en la banda de frecuencia de 2.4GHz se definen 13 canales disponibles, no en todos los lugares del mundo se emplean todos, sino que existen regiones

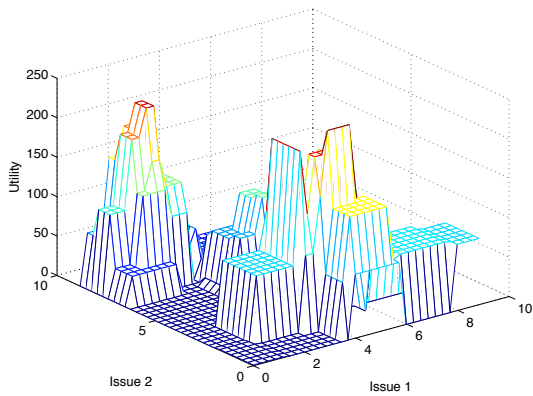


Fig. 2. Función de utilidad con múltiples máximos locales.

como Norteamérica donde se emplean solo los primeros 11 canales. En el presente trabajo, se ha limitado el rango de canales a 11, dado que el cálculo de la interferencia cocanal de la que se hablaba en la sección anterior se ha hecho basándonos en el estudio de [18], en el que se emplean 11 canales únicamente. Pese a que el estándar IEEE 802.11n permite el uso de canales de 40 MHz de ancho de banda (en lugar de los habituales 20 MHz), no se suelen emplear en la banda de 2.4 GHz, debido a la escasez y saturación de los mismos. Por ese motivo, en este trabajo se han considerado únicamente canales de 20 MHz.

Hemos asumido que los puntos de acceso están divididos en dos proveedores (P_1 y P_2), y que cada uno de estos proveedores tiene jurisdicción únicamente sobre la asignación de frecuencias de sus puntos de acceso. Así, P_1 y P_2 serán los dos agentes que negociarán la asignación de frecuencias. Utilizar únicamente dos proveedores en esta primera aproximación nos ha parecido adecuado, puesto que hay mucha más literatura en negociaciones complejas para el caso bilateral que para el multilateral (tres o más agentes).

Finalmente, cada uno de estos dos agentes calculará su utilidad para un determinado acuerdo o solución siguiendo el modelo que se ha presentado en la sección anterior, pero teniendo únicamente en cuenta la interferencia sobre los puntos de acceso que le correspondan. Nuestra hipótesis es que las características del problema (elevado número de soluciones y presencia de interdependencias entre atributos) harán que las funciones de utilidad de los agentes sean altamente complejas, con múltiples máximos y mínimos locales. En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de función de utilidad compleja. Desafortunadamente, la dimensionalidad y cardinalidad de los espacios de utilidad que vamos a manejar nos impedirán representarlos gráficamente (o incluso muestrearlos). No obstante, en la sección IV-C veremos resultados que apoyan esta suposición.

B. Protocolo de interacción

Existen multitud de protocolos de interacción para negociaciones bilaterales, desde la clásica alternancia de ofertas [22] a los protocolos basados en subasta [23]. Siguiendo con la hipótesis de que los escenarios de negociación resultantes del problema de asignación de canales en redes IEEE 802.11 serán altamente no lineales, y de acuerdo con la discusión al respecto en [24], hemos empleado un protocolo de mediación

con texto simple (*simple text mediation*) [25]. En su versión más sencilla, el protocolo de negociación funcionaría como sigue:

- 1) Se parte de un primer contrato candidato (S_0^c), generado al azar. Eso supondría, en nuestro caso, asignarle un canal aleatorio a cada punto de acceso.
- 2) En cada iteración t , el mediador propone el contrato S_t^c a los agentes.
- 3) Cada uno de los agentes vota a favor o en contra del contrato propuesto por el mediador.
- 4) El mediador genera un nuevo contrato S_{t+1}^c a partir de los contratos anteriores y de los votos recibidos de los agentes, y se reanuda el proceso en el paso 2.

El proceso continúa hasta que se alcanza un número máximo de iteraciones o se alcanza alguna otra condición de parada. Como puede verse, el protocolo así definido es muy genérico, y debe completarse definiendo los mecanismos de decisión o *estrategias* de los agentes negociadores y del mediador.

C. Mecanismos de decisión

Para el mediador, se ha implementado un mecanismo de generación de nuevos contratos que funciona como sigue:

- Si en un instante t ambos agentes han votado a favor del contrato S_t^c que se les ha presentado, se emplea ese contrato como contrato base S^b para generar el siguiente contrato S_{t+1}^c . En caso contrario, se toma como base el último contrato candidato que haya sido aceptado por ambos agentes.
- Para generar el siguiente contrato candidato S_{t+1}^c se toma el contrato S_b y se cambia el valor de uno de sus atributos al azar. En el caso que nos ocupa, se correspondería con escoger un punto de acceso al azar, y seleccionar de forma aleatoria un nuevo canal para el mismo.
- Después de un número fijo de iteraciones, el mediador anuncia el contrato final, que será el último contrato que haya sido aceptado por los dos agentes.

Para los agentes, se han considerado dos mecanismos diferentes para la emisión de los votos acerca de los contratos candidatos S^c :

- Hill-climber (HC): En este caso, el agente se comporta como un maximizador voraz de utilidad. El agente solo votará a favor de un contrato cuando éste le suponga una ventaja frente al anterior contrato mutuamente aceptado por ambos agentes. En el caso de que no haya contrato previo mutuamente aceptado, el agente votará a favor (esto hace que se acepte siempre el primer contrato propuesto por el mediador).
- Annealer (SA): En este caso se empleará una técnica muy empleada en optimización no lineal conocida como *simulated annealing* [26]. Cuando un contrato suponga una pérdida de utilidad respecto al anterior contrato mutuamente aceptado, existirá una probabilidad de que el agente acepte dicho contrato. Dicha probabilidad P_a depende de la pérdida de utilidad asociada al nuevo contrato Δu y de un parámetro conocido como temperatura de *annealing*, T , de tal forma que $P_a = e^{-\frac{\Delta u}{T}}$. La temperatura parte de un valor inicial, y decrece hasta cero

de forma lineal a lo largo de las sucesivas iteraciones del protocolo.

La elección de estos dos mecanismos no es casual. El uso de *simulated annealing* ha dado muy buenos resultados en negociación para espacios de utilidad no lineales [27], y es la base de varios de nuestros trabajos previos [13], [14]. Por otro lado, tal y como se argumenta en [25], la comparación entre *hill-climbers* y *annealers* permite valorar si el escenario al que nos estamos enfrentando es de alta complejidad, ya que en estos escenarios los negociadores voraces tienden a quedar atrapados en máximos locales, mientras que el negociador basado en *simulated annealing* tiende a escapar de ellos.

IV. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

A. Escenarios considerados

Se han probado diferentes algoritmos de asignación de canales en tres tipos de escenarios. En el primer caso, se han considerado 50 APs y 350 (50·7) clientes, en el segundo 50 APs y 500 (50·10) clientes y en el tercero 100 APs y 500 (100·5) clientes. Tanto la disposición de los APs como de los clientes se ha hecho de manera aleatoria en un plano, de manera que cada cliente se asocia al AP más cercano. Asimismo, si un cliente no tiene ningún AP en su área de cobertura (dada por la sensibilidad de su receptor, tal y como se ha descrito en la Sección II-B), se ha eliminado del problema, algo que también se ha hecho con los APs que no tienen ningún cliente asociado. Obviamente, conforme hay mayor densidad de nodos en la red, son menos los nodos que quedan inconexos. Para cada tipo de escenario y, dada la aleatoriedad de los mismos, se han generado 3 escenarios concretos, por lo que se ha trabajado con un conjunto de 9 escenarios. Además, dada la aleatoriedad de los diferentes algoritmos aplicados, cada uno de los algoritmos se ha ejecutado 10 veces en cada escenario. En la Tabla I se muestra un resumen de los escenarios probados, donde aparecen por un lado los nodos (APs y clientes) inicialmente dispuestos y los nodos que quedan finalmente tras eliminar los inconexos (ν). Además, con el objetivo de cuantificar la densidad de cada escenario, se muestra el número medio de señales interferentes que recibe cada nodo de la red (\bar{I}). Nótese que, aunque parezca un número medio de señales interferentes elevado (se han considerado escenarios con valores de \bar{I} entre 20 y 50), en realidad no lo es tanto, puesto que es habitual, al escanear redes IEEE 802.11, encontrarse conviviendo con 6 u 8 de ellas. Si cada una de ellas tiene 4-6 clientes conectados, alcanzamos un número medio de interferencias entre 24-48. También son habituales escenarios en los que hay pocos APs pero cada uno de ellos alberga a un gran número de usuarios, como por ejemplo en el caso de una red en un campus universitario, donde el AP que dé servicio a un aula tendrá conectado decenas de clientes.

B. Mecanismos analizados

Además de los mecanismos de negociación directamente objeto del estudio, que se han discutido en la sección III-C, se ha realizado una comparación con tres aproximaciones de referencia:

- Referencia aleatoria: como una primera línea base de referencia, se ha tomado la elección de una asignación

Tabla I
RESUMEN DE ESCENARIOS EMPLEADOS.

Escenario	# APs	# clientes	ν	\bar{I}
1	50	350	237	22.53
2	50	350	241	21.53
3	50	350	240	21.81
4	50	500	439	34.72
5	50	500	414	39.26
6	50	500	427	34.30
7	100	500	490	47.62
8	100	500	487	51.57
9	100	500	527	48.63

aleatoria de canales. En nuestro contexto, sería el equivalente a que cada punto de acceso escogiese de manera independiente un canal aleatorio en el que transmitir.

- Sequential Channel Search (SCS): una línea base algo más realista, inspirada en LCCS [6]. Se trata de un algoritmo en que los puntos de acceso se activan en secuencia, y cada AP escoge el canal en el que encuentra menos interferencias de otros APs y de clientes pertenecientes a otros APs. Si son varios los canales que se encuentran menos congestionados, se coloca aleatoriamente en uno de ellos.
- Augmented Lagrangian Harmony Search Optimization (ALHSO): Además de nuestros negociadores basados en *simulated annealing*, queríamos tener como referencia un optimizador no lineal independiente que empleara información completa. Hemos escogido *Harmony Search*, que es un algoritmo de optimización evolutivo inspirado en la composición musical [28]. En concreto, hemos usado una implementación disponible públicamente que utiliza multiplicadores aumentados de Lagrange para el manejo de restricciones [29].

C. Resultados

Para la elección de los parámetros de configuración de los escenarios se han escogido valores típicos o razonables desde un punto de vista realista, siendo los siguientes. La potencia de transmisión es de 30 mW, se han considerado antenas básicas con ganancia 0 dB ($G_t = G_r = 0$ dB) y la sensibilidad de los receptores es de -90 dBm. Además, las antenas se encuentran a $h_t = h_r = 1.5$ m de altura sobre el suelo y las pérdidas por obstáculos son de $L = 40$ dB. Todos estos valores sirven para calcular el radio de cobertura, siendo este de $R = 40.3$ m.

En primer lugar se estudian las prestaciones del algoritmo SA con diferentes valores de sus parámetros de configuración: temperatura inicial (T) y número de iteraciones. En general, una mayor temperatura inicial aumenta las posibilidades del optimizador para escapar de máximos locales, aunque una temperatura excesiva puede hacer que el optimizador escape del máximo global, por lo que el ajuste de este parámetro suele ser un proceso delicado y dependiente de la aplicación concreta. Para el caso del número de iteraciones, como regla general un mayor número de iteraciones proporciona más oportunidades de refinar la búsqueda, pero también aumenta el tiempo en que el algoritmo opera con temperaturas elevadas, y por tanto el riesgo de escapar del máximo global (además del coste computacional asociado, por supuesto). En las Fig. 3-5 se muestra cómo varía la utilidad al emplear diferentes valores

de temperatura y de iteraciones para los escenarios 3, 6 y 9 (para el resto de escenarios los resultados son muy similares, por lo que se omiten las gráficas por cuestiones de espacio). En dichas figuras se observa cómo conviene escoger el mayor número de iteraciones posible para obtener mayores valores de utilidad, ocurriendo esto en todos los escenarios estudiados (no únicamente en los mostrados en las figuras), excepto en uno (Fig. 4 con $T = 8$), donde el valor de utilidad desciende de 220.56 a 218.34 al pasar de 2000 a 3000 iteraciones. Respecto a la temperatura, vemos el máximo en $T = 1$. A partir de este momento, el algoritmo SA se ejecutará con $T=1$ y 3000 iteraciones.

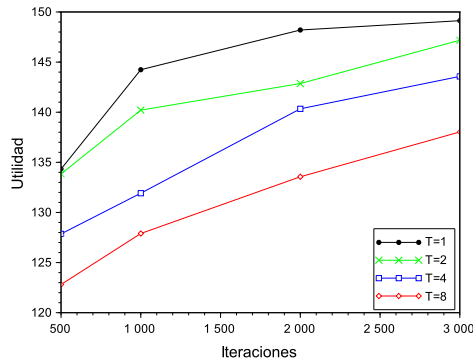


Fig. 3. Evaluación de SA en escenario 3.

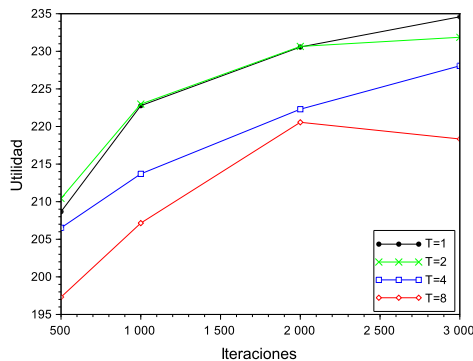


Fig. 4. Evaluación de SA en escenario 6.

A continuación se compara el algoritmo SA con el resto de propuestas: asignación aleatoria de canales, SCS, HC y ALHSO. En las Tablas II-IV se muestra la media y la desviación estándar de la utilidad para las 10 ejecuciones del algoritmo en cada uno de los escenarios. Asimismo, se resalta en negrita la mejor de las soluciones. Como se puede observar, en cuanto a la media de la utilidad, el algoritmo SA se muestra como la mejor solución en todos los casos excepto en uno de ellos (escenario 8), donde ALHSO es la mejor opción. La segunda mejor opción es SCS, seguido a cierta distancia de HC. Como cabía esperar, las peores prestaciones se consiguen con el mecanismo aleatorio, siendo estas muy bajas. En el caso de HC (que puede verse como un optimizador SA con $T = 0$), puede observarse que da buenos resultados en escenarios sencillos (Tabla II), mientras que su

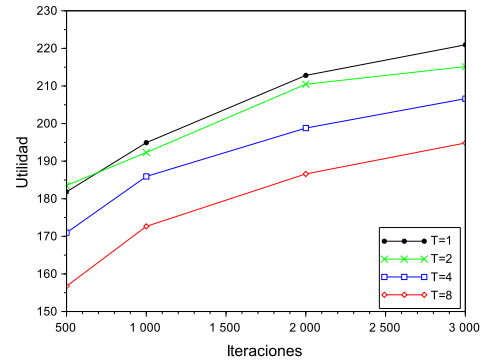


Fig. 5. Evaluación de SA en escenario 9.

Tabla II
UTILIDAD EN ESCENARIOS CON 50 APS Y 350 CLIENTES.

	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	avg	std	avg	std	avg	std
Aleatorio	59.36	9.61	73.74	10.68	65.81	13.76
SCS	106.74	4.30	121.20	7.18	122.78	4.46
ALHSO	121.64	4.17	141.09	3.56	132.92	3.95
HC	123.30	3.50	140.37	4.93	138.02	5.31
SA	130.89	2.65	149.16	1.65	149.13	2.27

rendimiento empeora al movernos a escenarios más complejos (Tablas II-IV), debido a la tendencia a quedarse en máximos locales.

Respecto a la desviación estándar de las soluciones, el algoritmo que presenta una menor desviación estándar es SA en casi todos los casos (excepto en los escenarios más complejos 8 y 9, donde SA es muy similar a ALHSO), seguido de ALHSO, SCS y Aleatorio. Como conclusión, podemos afirmar que superar a un algoritmo de optimización como ALHSO mediante técnicas de negociación como SA, nos indica que este tipo de técnicas son muy válidas y aconsejables para el problema bajo estudio. Puesto que SA requiere, tal y como se ha visto, de la configuración de dos parámetros (temperatura y número de iteraciones), para finalizar se va a hacer una comparativa de todos los algoritmos de manera relativa, con el objetivo de analizar el comportamiento de SA

Tabla III
UTILIDAD EN ESCENARIOS CON 49 APS Y 500 CLIENTES.

	Escenario 4		Escenario 5		Escenario 6	
	avg	std	avg	std	avg	std
Aleatorio	92.96	6.59	78.05	16.95	105.08	13.70
SCS	165.60	9.00	151.74	10.24	181.27	9.14
ALHSO	203.62	5.76	184.01	7.46	221.96	5.37
HC	196.82	9.94	179.11	11.06	211.76	11.05
SA	215.37	2.75	199.52	2.98	234.59	1.46

Tabla IV
UTILIDAD EN ESCENARIOS CON 100 APS Y 500 CLIENTES.

	Escenario 7		Escenario 8		Escenario 9	
	avg	std	avg	std	avg	std
Aleatorio	90.13	9.14	95.73	15.87	88.79	11.64
SCS	164.94	9.34	168.28	13.09	172.70	11.53
ALHSO	216.36	6.40	223.02	5.03	217.53	4.86
HC	196.33	8.07	199.51	8.74	199.65	7.73
SA	220.29	5.17	217.60	5.24	220.94	4.92

Escenario 1				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.91	0.95	0.98	1.00
T=2	0.90	0.93	0.97	0.98
T=4	0.84	0.88	0.92	0.95
T=8	0.80	0.85	0.90	0.91
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.45	0.82	0.93	0.94

Escenario 2				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.91	0.96	0.98	1.00
T=2	0.90	0.95	0.98	0.98
T=4	0.86	0.90	0.94	0.95
T=8	0.81	0.86	0.91	0.91
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.49	0.81	0.95	0.94

Escenario 3				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.90	0.97	0.99	1.00
T=2	0.90	0.94	0.96	0.99
T=4	0.86	0.88	0.94	0.96
T=8	0.82	0.86	0.90	0.93
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.44	0.82	0.89	0.93

Escenario 4				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.90	0.95	0.99	1.00
T=2	0.89	0.94	0.96	0.99
T=4	0.87	0.92	0.95	0.97
T=8	0.82	0.86	0.91	0.94
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.43	0.77	0.95	0.91

Escenario 5				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.88	0.95	0.98	1.00
T=2	0.87	0.95	0.98	1.00
T=4	0.88	0.91	0.94	0.96
T=8	0.82	0.86	0.90	0.94
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.39	0.76	0.92	0.90

Escenario 6				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.89	0.95	0.98	1.00
T=2	0.90	0.95	0.98	0.99
T=4	0.88	0.91	0.95	0.97
T=8	0.84	0.88	0.94	0.93
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.45	0.77	0.95	0.90

Escenario 7				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.79	0.89	0.98	1.00
T=2	0.80	0.88	0.95	0.96
T=4	0.78	0.85	0.91	0.91
T=8	0.70	0.77	0.85	0.86
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.41	0.75	0.98	0.89

Escenario 8				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.83	0.89	0.95	0.98
T=2	0.80	0.87	0.93	0.97
T=4	0.78	0.83	0.91	0.94
T=8	0.74	0.76	0.85	0.89
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.43	0.75	1.00	0.89

Escenario 9				
SA:	i=500	i=1000	i=2000	i=3000
T=1	0.82	0.88	0.96	1.00
T=2	0.83	0.87	0.95	0.97
T=4	0.77	0.84	0.90	0.94
T=8	0.71	0.78	0.84	0.88
	Aleatorio	SCS	ALHSO	HC
	0.40	0.78	0.98	0.90

Fig. 6. Resultados relativos al máximo.

si este no se configura adecuadamente.

En la Fig. 6 se muestra el valor medio de la utilidad para los diferentes escenarios y relativo al máximo (en negrita). Para facilitar la interpretación, en la tabla de resultados de SA se han marcado en verde las casillas que superan o igualan a ALHSO (también superan a SCS y Aleatorio, pero estos últimos son menos restrictivos). Además, se han marcado en amarillo aquellos casos en los que SA supera a SCS. Así, se observa como para temperaturas cercanas a $T = 1$ y 1000 o más iteraciones, SA supera a ALHSO. Además, en casi todos los casos (excepto para temperaturas altas y muy pocas iteraciones), SA supera a SCS. En la figura se muestran también los resultados de HC para 3000 iteraciones, que equivale a un SA con $T = 0$, y que podemos ver que tiene menor rendimiento que el mecanismo basado en SA para el mismo número de iteraciones.

Como conclusión, se puede recomendar el uso de técnicas de negociación como SA, ya que es mejor en casi todos los casos que SCS y, no es difícil encontrar parámetros de configuración que la hagan mejor incluso que un optimizador no lineal como ALHSO.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La asignación de frecuencias en entornos IEEE 802.11 basados en infraestructura no es un tema que haya recibido la suficiente atención por parte de la comunidad investigadora, en relación a su importancia y al impacto que tiene en un número elevado y creciente de usuarios. Esta escasez de trabajos quizás viene dada por la complejidad del problema, que es de tipo NP-complejo [30]. De hecho, en [30] se puede encontrar una revisión de técnicas de asignación de frecuencias en IEEE 802.11, donde se puede observar que no son muchas las propuestas realizadas. A nivel práctico, y hasta donde llega el conocimiento de los autores de esta propuesta, quizás la única técnica real que se emplea es la denominada LCCS (*Least Congested Channel Search*) [6]. Esta técnica, bastante rudimentaria, consiste en que, si un punto de acceso

detecta muchas interferencias en el canal actual, se mueve a la frecuencia menos congestionada en ese momento.

En este artículo se ha modelado el problema de la asignación de canales en redes IEEE 802.11n mediante grafos, de manera que la asignación de canales se traduce en el coloreado de las aristas de un grafo. Puesto que una de las propiedades más características de las redes IEEE 802.11 es que los canales se encuentran parcialmente solapados, se ha incluido dicho efecto en el modelado del problema mediante el uso de una matriz de interferencia cocanal.

Para realizar el coloreado de los grafos se ha planteado el uso de técnicas de negociación automáticas. Más concretamente, se ha empleado un protocolo de negociación bilateral con mediador, en el que los agentes negociadores (dos proveedores de acceso IEEE 802.11, cada uno controlando una fracción de los puntos de acceso del escenario) negocian con una estrategia basada en *Simulated Annealing* (SA). Como referencia para los resultados obtenidos, las aproximaciones basadas en negociación se han comparado con la asignación aleatoria de frecuencias, con una técnica heurística inspirada en LCCS y, finalmente, con la técnica de optimización denominada ALHSO (*Augmented Lagrangian Harmony Search*), que se basa en un algoritmo evolutivo inspirado en la música y que es muy adecuado para problemas de optimización con espacios de soluciones no lineales. Los resultados muestran que las prestaciones de la técnica aleatoria son muy pobres, seguida por SCS, que presenta prestaciones bastante superiores. Los mejores resultados (tanto para valores medios de la utilidad como para desviaciones estándar de la misma) se obtienen con las técnicas de negociación utilizando SA. Además, se han probado diversas configuraciones para el algoritmo SA, encontrándose prestaciones superiores de SA respecto a ALHSO en un buen número de configuraciones. Como conclusión general, se puede decir que las técnicas de negociación se muestran como muy útiles para la resolución de problemas de asignación de canales a redes IEEE 802.11.

Respecto a trabajos relacionados con nuestra propuesta, cabe citar los trabajos de [31] y [32], aunque no se centran en IEEE 802.11 ni emplean técnicas de negociación. Una propuesta que trata de coordinar puntos de acceso IEEE 802.11 para la asignación de frecuencias sin el empleo de grafos se puede encontrar en [33]. Aunque quizá el trabajo más relacionado con nuestra propuesta sea el de [34], por estar inspirado en el problema del coloreado de grafos y por utilizar una medida de la bondad de las soluciones obtenidas durante el proceso de optimización que recuerda mucho a las funciones de utilidad que se emplean en negociación.

Aunque los resultados de los experimentos son satisfactorios, quedan muchas posibilidades de trabajo futuro. Una vez demostrado que las técnicas de negociación no lineal pueden aplicarse satisfactoriamente a este sistema, cabe plantearse una comparativa entre una selección más amplia de las mismas. También estamos interesados en estudiar la influencia de diferentes propiedades de los escenarios en la adecuación de unas y otras (de un modo similar a como planteamos en [35]). Finalmente, sería interesante analizar como escalan este tipo de técnicas no sólo con el tamaño de los escenarios, sino también con el número de proveedores (incluso llegando al caso límite de APs independientes).

Como trabajo futuro se plantea, en primer lugar, implementar otras técnicas de negociación automática (incluidas multilaterales) que pueden ser útiles para resolver el problema, además de otras técnicas heurísticas que se han propuesto en la literatura. Por otro lado, se quiere probar dichas técnicas sobre grafos que reflejen un escenario real tridimensional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos TIGRE5-CM Comunidad de Madrid (S2013/ICE-2919), ATLAS-Project VA172A12-2, MICINN MTM2011-22792, MINECO MTM2014-54207 y MINECO TIN2014-61627-EXP.

REFERENCIAS

- [1] E. Au, M. Cheong, C. Ngo, C. Cordeiro, W. Zhuang, "The future of Wi-Fi - Guest Editorial", IEEE Communications Magazine, vol.52, no.11, pp.20,21, 2014.
- [2] P. Dalal, M. Sarkar, K. Dasgupta, N. Kothar, "Link Layer Correction Techniques and Impact on TCP's Performance in IEEE 802.11 Wireless Network", Communications and Network, vol.6, no.2, ID 45714, 2014.
- [3] R. Liao, B. Bellalta, M. Oliver, Z. Niu, "MU-MIMO MAC Protocols for Wireless Local Area Networks: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials (pendiente de publicación).
- [4] K. Aardal, S. van Hoesel, A. Koster, C. Mannino, A. Sassano, "Models and solution techniques for frequency assignment problems", Annals of Operations Research, vol. 153, no. 1, pp. 79-129, 2007.
- [5] F. Luna, E. Alba, Antonio J. Nebro, S. Pedraza, "Evolutionary algorithms for real-world instances of the automatic frequency planning problem in GSM networks." Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, pp. 108-120. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] M. Achanta, "Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points", US Patent App. 10/959,446, 2006.
- [7] F. Ren, M. Zhang, K. M. Sim, "Adaptive conceding strategies for automated trading agents in dynamic, open markets" Decision Support Systems, vol.46, no.3, pp.704-716, 2009.
- [8] R. B. Myerson, M. A. Satterthwaite, "Efficient mechanisms for bilateral trading", Journal of Economic Theory, vol. 29, no. 2, pp. 265-281, 1983.
- [9] T. Ito, M. Klein, H. Hattori, "A multi-issue negotiation protocol among agents with nonlinear utility functions", Multiagent Grid Syst., vol.4, no.1, pp.67-83, 2008.
- [10] K. M. Sim, B. Shi, "Concurrent negotiation and coordination for grid resource coallocation", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics - Special issue on game theory, vol.40, no.3, pp.753-766, 2010.
- [11] R. G. Smith, "The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver", IEEE Transactions on Computers, vol. C-29, no.12, pp.1104-1113, 1980.
- [12] M. Wu, M. de Weerd, H. La Poutré, "Efficient methods for multi-agent multi-issue negotiation: Allocating resources", Principles of Practice in Multi-Agent Systems, Lecture Notes in Computer Science vol. 5925, pp. 97-112, 2009.
- [13] I. Marsa-Maestre, M. A. Lopez-Carmona, J. R. Velasco, E. de la Hoz, "Avoiding the prisoner's dilemma in auction-based negotiations for highly rugged utility spaces", En Actas de 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), vol.1, no.1, pp.425-432, 2010.
- [14] I. Marsa-Maestre, M. A. Lopez-Carmona, J. R. Velasco, T. Ito, M. Klein, K. Fujita, "Balancing utility and deal probability for auction-based negotiations in highly nonlinear utility spaces", En Actas de 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pp. 214-219, 2009.
- [15] Z. Tuza, Graph coloring, *Handbook of Graph Theory*, Discrete Mathematics and Its Applications, vol. 25, pp. 408-438, CRC Press, 2003.
- [16] E. Z. Tragos, S. Zeadally, A. G. Fragkiadakis, V. A. Siris, "Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks: A Comprehensive Survey", IEEE Comm. Surveys Tutorials, vol. 15, no 3, pp. 1108-1135, 2013.
- [17] D.B. Green, A.S. Obaidat, "An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices", En Actas de IEEE International Conference on Communications (ICC), vol. 5, pp. 3424-3428, 2002.
- [18] S.W.K. Ng, T.H. Szymanski, "Interference measurements in an 802.11n wireless mesh network testbed", En Actas de 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2012.
- [19] A. Bazzi, "On uncoordinated multi user multi RAT combining", In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference Fall, 2011.
- [20] J. Geier, "How to: Define Minimum SNR Values for Signal Coverage" Wireless-Nets Independent Consulting. http://www.wireless-nets.com/resources/tutorials/define_SNR_values.html (acc. 1/4/2015).
- [21] S. Fatima, M. Wooldridge, N. R. Jennings, "Optimal negotiation strategies for agents with incomplete information, Lecture Notes on Computer Science, vol. 2333, pp. 53-68, 2001.
- [22] A. Rubinstein, "Perfect equilibrium in a bargaining model", *Econometrica*, vol. 50, no. 1, pp. 97-109, 1982.
- [23] H. Hattori, M. Klein, T. Ito, "Using iterative narrowing to enable multi-party negotiations with multiple interdependent issues", En Actas de 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS), pp 1-3, 2007.
- [24] I. Marsa-Maestre, "Contribución a la negociación automática en espacios de utilidad complejos", PhD thesis, Universidad de Alcalá, 2009.
- [25] M. Klein, P. Faratin, H. Sayama, Y. Bar-Yam, "Negotiating complex contracts", *Group Decision and Negotiation*, vol. 12, no. 2, pp. 111-125, 2003.
- [26] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol.220, no.4598, pp.671-680, 1983.
- [27] F. Lang, A. Fink, "Learning from the metaheuristics: Protocols for automated negotiations", *Group Decision and Negotiation*, vol. 24, no.2, pp.299-332, 2015.
- [28] Z.W. Geem, J.H. Kim, G.V. Loganathan, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search", *Simulation*, vol. 76, no.2, pp. 60-68, 2001.
- [29] R. E. Perez, P. W. Jansen, J.R.R.A. Martins, "pyOpt: A Python-Based Object-Oriented Framework for Nonlinear Constrained Optimization", *Structures and Multidisciplinary Optimization*, vol.45,no.1, pp. 101-118, 2012. <http://www.pyopt.org/reference/optimizers.alhso.html>.
- [30] S. Chiochan, E. Hossain, J. Diamond, "Channel assignment schemes for infrastructure-based 802.11 WLANs: A survey", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2010.
- [31] C. McDiarmid, "Frequency-distance constraints with large distances", *Discrete Mathematics*, vol. 223, no. 1-3, pp. 227-251, 2000.
- [32] L. Narayanan, S.M. Shende, "Static frequency assignment in cellular networks", *Algorithmica*, vol. 29, no. 3, pp. 396-409, 2001.
- [33] M. Abusubaih, J. Gross, S. Wiethoelter, A. Wolisz, "On access point selection in IEEE 802.11 wireless local area networks", En Actas de 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, pp 879-886, 2006.
- [34] A. Mishra, S. Banerjee, W. Arbaugh, "Weighted Coloring Based Channel Assignment for WLANs", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 9, no 3, pp. 19-31, 2005.
- [35] I. Marsa-Maestre, M. Klein, C. M. Jonker, R. Aydoğan, "From problems to protocols: Towards a negotiation handbook", *Decision Support Systems*, vol. 60, no.0, pp.39-54, 2014.