

# Asignación Distribuida Coordinada de Canales para WLANs con Acceso Oportunista

Diana Urriola, Fernando Soriano, Phd. Francisco Novillo  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
{durriola, fsorian, fnovillo}@espol.edu.ec

## Resumen

*Las WLANs cuentan con una cantidad limitada de canales de frecuencia (espectro radio eléctrico), donde la saturación de estos canales en áreas densamente pobladas se torna un problema inevitable, y es imperativo encontrar nuevos procesos que permitan una eficiente administración de este recurso para mantener una buena calidad de funcionamiento (operación). En este artículo se presenta un algoritmo, basado en la técnica probabilística "Simulated Annealing", para la asignación de canales de manera distribuida coordinada para redes WLAN, mediante la construcción de árboles de expansión mínima. Se realiza un proceso de asignación de costos y un análisis de niveles de interferencia, el mismo que se ejecuta para cada punto de acceso (AP) del escenario. El objetivo de este trabajo es conseguir una asignación eficiente de canales para cada AP, sea en la banda ISM, o de manera oportunista en una banda licenciada, que permita minimizar los niveles de interferencia de cada AP.*

**Palabras Claves:** Punto de acceso, Banda ISM; Banda primaria; Recocido simulado; Asignación de canales.

## Abstract

*WLANs have a limited number of frequency channels (radio spectrum), where the saturation of these channels in densely populated areas becomes an inevitable problem, and it is imperative to find new processes that enable efficient management of this resource to maintain good performance (operation). In this article is presented an algorithm, based on probabilistic technique 'Simulated Annealing', for channel assignment in a distributed coordinated manner for WLAN networks, by building Minimum Spanning Trees. A process of cost allocation and an analysis of interference levels is performed, the same as it is executed for each access point (AP) of the stage. The objective of this work is to achieve efficient allocation of channels for each AP, either in the ISM band, or opportunistically in a licensed band, which minimizes interference levels for each AP.*

**Keywords:** Access point, ISM band; Primary band; Simulated annealing; Channel allocation.

## 1. Introducción

La creciente instalación de Access Points (APs) para la implementación de redes inalámbricas, tanto para usuarios residenciales como corporativos [1], ha incrementado los niveles de interferencia entre APs. Debido principalmente al limitado número de canales (e.g. 11 en América) que disponen para operar en la banda ISM. En este sentido mientras más usuarios sean desplegados sobre una determinada superficie, más congestión causarán a la banda asignada, lo que podría causar una degradación de los servicios.

En este contexto, una alternativa para mejorar el rendimiento de la red es el control de potencia de los APs, debido a que el incremento de la potencia permite aumentar su radio de cobertura y minimizar la congestión de la banda utilizada, alojando una mayor cantidad de usuarios [2].

También, controlar la relación señal a ruido, permite que la manipulación de la energía de la señal y la capacidad del canal mejoren los servicios brindados por las WLANs [2].

Otra solución para descongestionar la red es el uso de mecanismos que permiten la asignación del canal que genere el menor nivel de interferencia a los APs [3]. Al respecto existen algunos estudios de asignación de canales para WLANs, así en [2] se propone minimizar los niveles de interferencia causados por el solape cocanal en los APs mediante un análisis de costo.

En [4] se analiza un esquema distribuido de asignación de canal en WLANs para el sector residencial, que busca minimizar los niveles de interferencias causados por el descoordinado despliegue de APs obteniendo una retroalimentación entre el AP y sus usuarios basados en el estándar IEEE

802.11k para la administración de los recursos radio. Estos mecanismos no son suficientes debido al limitado número de canales en la banda ISM. En ese contexto, permitir a los APs el uso oportunista de canales adicionales que se encuentran disponibles en bandas licenciadas contribuiría a descongestionar la banda ISM. Teóricamente este uso de canales licenciados es llamado acceso oportunista al espectro (OSA) por sus siglas en inglés [5], el cual bajo un esquema jerárquico, permite que usuarios secundarios sean beneficiados, evitando la interferencia en bandas licenciadas.

Las porciones del espectro que se encuentran en desuso (e.g. espacios en blanco) son potenciales bandas que se han estudiado para su debida explotación oportunista [6]. Para ello, estudios del espectro en [7] y en [8] muestran los planes de expansión de países en Sudamérica para cubrir la demanda de servicios de telecomunicaciones, ya que disponen de bandas que no son explotadas eficientemente.

Por otro lado, existen mecanismos de asignación de canales con OSA, así en [6] y en [1] se muestra que para conseguir un eficiente uso del espectro se deben cumplir dos cosas: la priorización y la heterogeneidad del espectro. De esta manera, la descongestión de la banda ISM permite reducir los niveles de interferencia y el desempeño deseado de las WLANs.

Por lo tanto, en el presente trabajo, se propone un algoritmo coordinado de asignación de canales para WLANs con capacidades OSA. En particular este algoritmo propone descongestionar la banda ISM mediante el uso oportunista de canales disponibles en bandas licenciadas (e.g. banda de TV), realizando una coordinación previa entre dispositivos WLANs.

La coordinación se realizará formando agrupaciones de APs, mediante la construcción de Minimum Spanning Tree (MST) [6] entre APs cercanos basados en los niveles de interferencia.

Se adopta el algoritmo "Simulating Annealing" [9] para la búsqueda de un canal óptimo, ya sea en la banda ISM o en banda licenciada, puesto que realiza un recorrido aleatorio y en base a probabilidades elige el canal candidato que genere la menor interferencia a la agrupación. Se evalúa el algoritmo bajo criterios de densidad de APs y se lo compara con otros ya conocidos.

## 2. Modelación del sistema

### 2.1 Descripción del Escenario

Para el desarrollo de este trabajo, nos situamos en un escenario urbano densamente poblado tipo Manhattan [9], donde tenemos una alta concentración de APs. La Figura 1 muestra el escenario donde se encuentran  $n_{edf}$  edificaciones, de altura  $h_1$ , ancho  $h_2$  y profundidad  $h_3$ ; estas edificaciones tienen  $h_4$  pisos, divididos en  $h_5$  cubículos, los mismos que tienen un ancho de  $h_6$ , una profundidad  $h_7$  y una altura  $h_8$ . Cada edificación se encuentra separada una de otra por

calles de ancho  $c_1$  y de largo  $c_2$ , basados en el modelo propuesto.

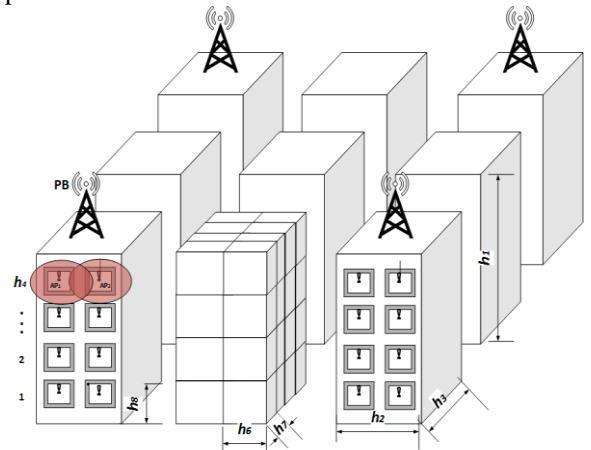


Figura 1. Escenario propuesto. Vista en 3d del escenario

En este estudio, los APs se encuentran instalados en el centro de cada cubículo en el área del techo, para simplificar los cálculos. Cada AP cuenta con una cantidad  $i + p$  canales de frecuencia (CF) disponibles. Al inicio se plantea el peor escenario, en donde a todos los APs se les asigna el mismo CF. Los canales  $i$  operan en la banda de 2,4 GHz, pertenecientes a la banda ISM. El uso de esta banda es libre y para este estudio se la denomina banda secundaria. De manera complementaria, los canales  $p$  operan en la banda UHF. Debido a que los canales UHF son concesionados, su uso es exclusivo y esta banda la denominaremos banda primaria (PB), y donde sus usuarios los llamaremos usuarios primarios (PUs). Las estaciones base de banda primaria se encuentran ubicadas en los edificios esquineros del escenario. El canal de operación de las PBs es asignado aleatoriamente.

### 2.2 Modelo de Interferencia

#### 2.2.1 Distancia de Uso y Distancia de Interferencia.

Las señales de radio que emiten los APs y PUs, son irradiadas por antenas omnidireccionales, donde cada dispositivo emite su señal a cierta distancia, la misma en la que estos pueden recibir a otros, y esta distancia se denomina distancia de uso.

La distancia en la cual un dispositivo transmite un canal determinado, puede ser recibido por otros dispositivos receptores sintonizados en el mismo canal o canales adyacentes se denomina distancia de interferencia.

#### Distancia de Interferencia AP y AP

La distancia de interferencia (i.e. distancia dentro de la cual un AP interfiere a otro AP) entre dos AP se determina mediante:

$$D_{I_{AP1 \rightarrow AP2}} = D_{U_{AP1}} \left( 1 + 10^{\left( \frac{M_{AP} - \Delta_{AP1, AP2}}{10\alpha} \right)} \right), \forall \rho_{2,1} > 0 \quad (1)$$

donde  $D_{U_{AP_1}}$  es la distancia de uso (i.e. distancia que representa la cobertura de un AP) del  $AP_1$ ,  $M_{AP}$  es el margen de protección del AP; y  $\Delta_{AP_1,AP_2}$  es un factor de pérdida por solape de canal en dB, el mismo que se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta_{AP_1,AP_2} = -10 \log(\rho_{AP_1,AP_2}) \quad (2)$$

$\rho_{AP_1,AP_2}$  es el factor de interferencia por solape de canal, el cual se determina de la siguiente manera [6]:

$$\rho_{AP_1,AP_2} = \left| \frac{B_{f_2} - B_{f_1}}{B_{f_1}} \right| \quad (3)$$

donde  $B_{f_1}$  es el ancho del canal del  $AP_1$  centrada en la frecuencia  $f_1$ , y  $B_{f_2}$  es el ancho del canal del  $AP_2$  centrado en la frecuencia  $f_2$ , como se muestra en la Figura 2.

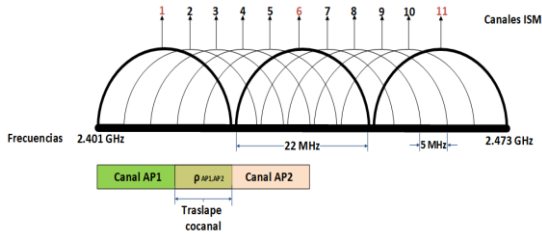


Figura 2. Solape de canales entre APs

### Distancia de Interferencia AP y PU

La distancia de interferencia entre un AP y un PU, se determina mediante:

$$D_{I_{AP \rightarrow PU}} = D_{U_{AP}} \left( 1 + 10^{\left( \frac{S_{AP} - S_{PU} + M_{AP} - \Delta_{PU,AP} - L_M}{10\alpha} \right)} \right), \forall \rho_{2,1} > 0 \quad (4)$$

donde  $D_{U_{AP}}$  es la distancia de uso del AP,  $S_{AP}$  es la sensibilidad del AP,  $S_{PU}$  es la sensibilidad del PU,  $M_{AP}$  es el margen de protección del AP, y  $L_M$  es la pérdida de trayectoria.

### Interferencia entre AP y AP

Para que exista interferencia entre un AP y otro, primero se debe cumplir que la distancia de interferencia del  $AP_1$  alcance o supere la distancia de uso del  $AP_2$ . El nivel de interferencia que percibe un AP desde cualquier otro AP, se describe a continuación:

$$I_{AP_1 \rightarrow AP_2} = P_{TxAP_1} - L_{AP_1,AP_2} - \Delta_{AP_1,AP_2} \quad (5)$$

donde,  $P_{TxAP_1}$  es la potencia a la que transmite el  $AP_1$ ;  $L_{AP_1,AP_2}$  es la pérdida de trayectoria de la señal desde el  $AP_1$  al  $AP_2$  en ISM o UHF, y  $\Delta_{AP_1,AP_2}$  es el factor de pérdida de solape por canal entre APs, que se calcula de manera similar a la expresión (2)

### Interferencia entre AP y PU

Para que exista interferencia entre un AP y un PU, primero se debe cumplir que la distancia de

interferencia del AP alcance o supere la distancia de uso del PU.

El nivel de interferencia que censa un PU desde cualquier AP, se describe como:

$$I_{AP \rightarrow PU} = P_{TxAP} - L_U - \Delta_{AP,PU} \quad (6)$$

donde,  $P_{TxAP}$  es la potencia a la que transmite el AP;  $L_U$  es la pérdida de la señal desde el AP al PU, y  $\Delta_{AP,PU}$  es el factor de pérdida de solape por canal entre AP y PU, que se determina de igual forma que la expresión (2).

## 3. Formulación Matemática

### 3.1. Planteamiento del Problema

En la Figura 3 se muestra un esquema donde se propone la asignación de canales con el fin de minimizar los niveles de interferencia, y que una mínima cantidad de APs usen canales de la banda primaria.

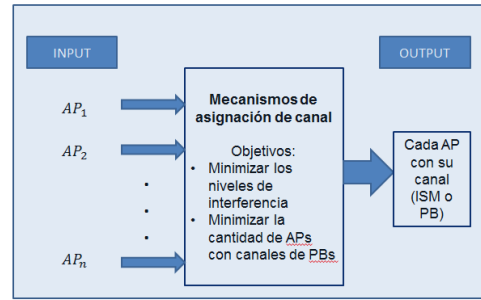


Figura 3. Esquema del sistema

Se observa que los  $AP_1, AP_2, \dots, AP_n$  representan todos los APs ubicados en el escenario. Para este estudio, de manera inicial se asigna el mismo canal para todos los APs, para analizar el caso de máxima interferencia en el escenario. Una vez calculada las distancias de uso e interferencia entre los APs, y cumpliendo la condición de interferencia se inicia la agrupación de estos.

### 3.2. Formulación del Problema

La formulación de este problema de una manera matemática, considera que el conjunto  $AP = \{AP_1, AP_2, AP_3, \dots, AP_n\}$  pertenece a los  $n$  APs desplegados en el escenario. La posición de un AP cualquiera  $AP_k$  está definido por  $d(AP_k) = \{(x, y, z)/x, y, z \in \mathbb{R}\}$ . El canal cuando  $AP_k$  opera en la banda ISM se define como  $S(AP_k) = \{i|i = 1,2, \dots, 11\}$ . En caso de que  $AP_k$  opere en un canal  $p$  de banda primaria, se define como  $P(AP_k) = \{p|p = 21,22, \dots, 49\}$ . Por lo tanto el conjunto total de canales disponibles para  $AP_k$  se denota como:

$$Tch(AP_k) = S(AP_k) + P(AP_k) \quad (7)$$

Dos APs son vecinos cuando existe un edge entre ellos, esto es que el cálculo de la condición de interferencia cocanal sea mayor a cero. De este modo, se define:  $V(AP_k) = \{AP_i | \forall AP_i \in AP, I(AP_k^i, AP_i^i) > 0\}$  como el conjunto de vértices (vecinos de  $AP_k$ ). Una vez determinada la vecindad de todos los APs del escenario, se procede a agrupar cada AP con sus respectivos vecinos en base a su límite, para formar uno o varios grafos [6].

## 4. Algoritmo Distribuido Coordinado

### 4.1. Etapa de Coordinación

La etapa de coordinación del algoritmo revisa el conjunto de vecinos de cada AP dentro de un grafo para determinar la cantidad de edges de cada AP. Para la construcción del MST dentro de cada grafo se ubica de manera aleatoria en un AP, luego se calcula su número de edges y se compara ese valor con la cantidad de edges de sus APs vecinos. Si existe algún AP vecino con mayor número de edges que el primer AP analizado, se traslada a ese AP y se vuelve a preguntar por la cantidad de edges que tienen sus vecinos, de esta manera este proceso se repite. Ge veces a fin de llegar a un AP con máxima cantidad de edges. Luego de definir el primer AP del MST, se consulta entre sus vecinos cuál de estos cuenta con la mayor cantidad de edges y se lo incluye al MST, este proceso final se realiza para generar un MST con una cantidad de nodos menor o igual que  $N_c$ .

### 4.2. Etapa de Asignación

Una vez formados los MST, se analiza las condiciones de interferencia. La interferencia resultante entre dos APs se denota como la relación entre potencia recibida y sensibilidad del AP. La máxima interferencia resultante entre APs se denota en  $MI_{AP_k}^i = \max_{\forall AP_l \in V(AP_k)} I(AP_k^i, AP_l^{Tch(AP_l)})$ . Si  $MI_{AP_k}^i$  está por debajo del umbral de  $I_{MAX}$ , entonces el canal  $i$  es considerado un canal fiable para  $AP_k$ . Según lo antes establecido, la función de utilidad  $U(MI_{AP_k}^i)$  es usada para revisar los valores de  $MI_{AP_k}^i$ , dada la preferencia de  $AP_k$  al canal  $i$  en la búsqueda del canal de operación. Puesto que la función de utilidad tiene un comportamiento decreciente con respecto al  $MI$ , se determina que con un menor  $MI$  de un canal se obtiene la mayor utilidad de ese canal.

Como en [10], se utiliza una función sigmoide para el análisis, y se describe a continuación:

$$U(MI_{AP_k}^i) = \begin{cases} 1 - (1 - z)e^{s(MI_{AP_k}^i - I_{MAX})}; & MI_{AP_k}^i \leq I_{MAX} \\ ze^{-s(MI_{AP_k}^i - I_{MAX})}; & \text{otros} \end{cases} \quad (8)$$

donde  $z$  representa el valor de la utilidad cuando  $MI_{AP_k}^i = I_{MAX}$ , y  $s$  determina la pendiente de la función de utilidad.

La utilidad total de cada MST se define por las utilidades generadas de cada AP,  $UT = \sum U_{AP_k}^i; \forall AP_k \in AP, i \in Tch$ .

### 4.3. Pseudocódigo

El desarrollo del algoritmo esta simplificado en la Figura 4, donde se muestra un proceso iterativo en cada MST, basado en la técnica probabilística Simulated Annealing (SA). El funcionamiento esta descrito a continuación: se asigna un valor inicial de temperatura  $T_0$ , la temperatura mínima  $T_{min}$  y el coeficiente de enfriamiento  $CR$  las cuales son constantes del sistema. La  $T_{min}$  es una constante que trabaja como factor de convergencia. Se obtiene un nuevo valor para el canal  $i_x$ , mediante el cálculo de una probabilidad que va de 0 al 1 (línea: 1).

```

1. Set  $T \leftarrow T_0$ ; temperatura inicial
   Set  $CR, T_{min}, ex$ ; constantes del sistema
   Asignación aleatoria de canales  $i$  a APs del
   escenario
2. While (número de iteraciones no es alcanzado)
   o ( $T > T_{min}$ )
3. Siguiete AP a analizar, con su respectivo canal
   actual  $i_x$ ;
4. Obtiene un nuevo canal,  $j_x$ ;
5. Calcular  $TU_{Tx} = U_{Tx}(i_x) - U_{Tx}(j_x)$ 
6. If  $TU_{Tx} < 0$  then
7.    $i_x = j_x$ ;
8. elseif  $TU_{Tx} > 0$  then
9.   if  $random[0,1] < e^{(-TU_{Tx}/T)}$  then
10.     $i_x = j_x$ ;
11.   end(9)
12.   elseif  $TU_{Tx} = 0$  then
13.    if  $random[0,1] < e^{(-ex/T)}$  then
14.       $i_x = j_x$ ;
15.    end(13)
16.   end(12)
17.   end(8)
18.   end(6)
19. Actualizar  $T = CR.T$ , y numero de iteraciones
20. end(2)

```

Figura 4. Pseudocódigo de algoritmo

Como el algoritmo se ejecuta periódicamente, la condición de parada del algoritmo se establece (línea:2). Probabilísticamente se obtiene un posible nuevo canal  $j_x$  evaluando un valor entre (0~1) (línea: 4). La decisión de mantener el canal  $i_x$  o adoptar la posible nueva asignación de canal  $j_x$ , dependerá de la comparación entre utilidades  $TU_{Tx}$  (línea: 5), donde  $U_{Tx}(j_x)$  denota la suma de utilidades del nuevo canal  $j_x$  de todos los vecinos del AP que se está analizando (línea: 3), y  $U_{Tx}(i_x)$  representa la suma total de

utilidades del AP del canal actual  $ix$  de todos los vecinos del AP presente. Por lo tanto, si la utilidad se incrementa (i.e.  $TU_{Tx} < 0$ ), se acepta al nuevo canal  $jx$  (línea: 6-7). En el caso de que la nueva posible asignación disminuya la utilidad (i.e.  $TU_{Tx} > 0$ ), se puede aceptar el nuevo canal en base a una probabilidad que depende de  $TU_{Tx}$  y el parámetro de temperatura actual  $T$  (línea: 8-10). En el caso de que la nueva asignación coincida con la misma utilidad del canal actual (i.e.  $TU_{Tx} = 0$ ), se puede aceptar el nuevo canal en base a una probabilidad que depende de  $ex$ , y el parámetro de temperatura actual  $T$  (línea: 12). Para otros casos, el acceso o combinación de accesos presente no cambia. El valor de temperatura  $T$  se actualiza en cada iteración mediante el factor de enfriamiento  $CR$ , con lo que gradualmente irá decreciendo, y a su vez se actualiza el número de iteraciones, de manera que la probabilidad de aceptar una nueva asignación de accesos que no mejoran la utilidad tiene la misma tendencia (línea: 19).

## 5. Evaluación del Algoritmo

En esta sección se evalúa el desempeño del algoritmo de asignación de canales de manera coordinada y distribuida, bajo un denso despliegue de APs, y a agrupaciones de clusters de tamaño 1-100, y de todo el escenario. El algoritmo propuesto es comparado con otros dos mecanismos de asignación de canales: MM (Min-Max) [11], donde la asignación de canales que se obtiene se realiza a partir de la comparación de canales, tomando el menor valor de interferencia de la máxima interferencia obtenida por cada canal, y la asignación de canales realizada en forma aleatoria (RDM) que permite distribuir equitativamente el uso de canales de una forma probabilística sencilla.

### 5.1. Parámetros de Configuración

Para este estudio en particular, se asume que la máscara de transmisión del espectro para los usuarios de la banda primaria e ISM es rectangular. En nuestro caso en particular tomamos 28 canales no solapados de la banda primaria (21-49), de 6MHz de ancho de banda. Todas las evaluaciones se realizaron usando técnica de instantáneas periódicas en 200 iteraciones, compuesta por 16 edificios del escenario denso tipo Manhattan, los cuales están distribuidos en un área de  $450 \times 450 \text{m}^2$ , con una altura de 8 pisos de 3m cada uno, considerando un escenario inicial de 1296 APs, todos con el mismo canal ISM. Dentro de esta área se consideran los parámetros de configuración que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de configuración

Parámetro	Valor
Cantidad de edificaciones, $n_{\text{edf}}$	81
Ancho de la calles, $c_1$	18 m
Pisos en cada edificación, $h_4$	8
Altura de edificaciones, $h_1$	24 m
Ancho de edificaciones, $h_2$	100 m
Profundidad de cada edificación, $h_3$	100 m
Ancho de cada habitáculo, $h_6$	25 m
Profundidad del habitáculo, $h_7$	25 m
Altura del habitáculo, $h_8$	3 m
Cantidad de habitáculos por piso, $h_5$	16
Cantidad de BS de banda PB	4
Radio de cobertura de PB	550 m
Numero de iteraciones	200
Potencia de transmisión de APs	17 dBm
Pendiente de propagación, $\alpha$	3.5
Factor de pérdida por piso, $L_{\text{floor}}$	18.3dB
Factor de pérdida por pared, $L_{\text{wall}}$	6.9 dB
Factor de pérdida por ventana, $L_{\text{window}}$	1 dB
Sensitividad de APs	-80 dBm
Sensitividad de PUs	-80 dBm
Numero de canales PB	28
Numero de canales ISM	11
Ancho de canal de PB	6MHz
Ancho de canal de ISM	22MHz
Umbral $I_{\text{MAX}}$	0.45
Temperatura inicial, $T_0$	100°
Factor de enfriamiento, CR	0.6
Margen de proteccion del AP, $M_{\text{AP}}$	10 dB
Margen de proteccion del PU, $M_{\text{PU}}$	15 dB

### 5.2. Parámetros de Simulación

Con el fin de obtener el mejor rendimiento del algoritmo, fue necesario parametrizar sus variables y así poder determinar los valores más óptimos para su funcionamiento. Este proceso de parametrización se realizó para 200 escenarios, con una densidad máxima de 768 APs.

Para la determinación de este valor se tomó una muestra del 50% de la densidad máxima de APs, realizando MSTs de un máximo de 50 APs. La Figura 5 muestra la máxima interferencia del escenario, y a su vez la Figura 6 la cantidad de iteraciones promedio que cada AP necesita ejecutar antes de converger, a diferentes valores de  $s$  (pendiente de la función de utilidad) y de CR (factor de enfriamiento). Refiriéndose a la Figura 5, se encuentra que un valor elevado de CR presenta una interferencia baja en comparación con los demás valores, a su vez la Figura 6 muestra que con el mismo valor de CR se necesitaría

un mayor número de iteraciones, por ende un mayor procesamiento y uso de recursos de los APs.

La Figura 7.a) nos presenta la gráfica de máxima interferencia en ISM por AP, a diferentes porcentajes de llenado del escenario, tomando como punto máximo el valor de 768 APs, en ella se puede apreciar que con un valor de CR de 0.9 se obtiene un pequeño decremento en cuanto a la máxima interferencia en comparación con un valor de 0.6, el mismo que en la Figura 6 presenta un procesamiento mucho menor, y para un valor de 0.1 la diferencia en cuanto a interferencia se vuelve más notoria ya que esta empeora; la Figura 7.b) muestra la gráfica de máxima interferencia en PB por AP, a diferentes porcentajes de llenado del escenario tal como en la gráfica anterior; en ella se puede observar que variando el valor de CR entre 0.1, 0.6 y 0.9, la interferencia no presenta un cambio significativo, por esta razón y las anteriores ya expuestas, y tratando de usar la menor cantidad de recursos de los dispositivos APs, se acepta que un valor óptimo y eficiente de CR es el valor de 0.6, así mismo destacando la Figura 5 y Figura 6, se observa que las curvas de interferencia y número de iteraciones, estas llegan a converger para valores de  $s$  entre 15 y 22, para este trabajo se optó por un valor para  $s$  de 18.

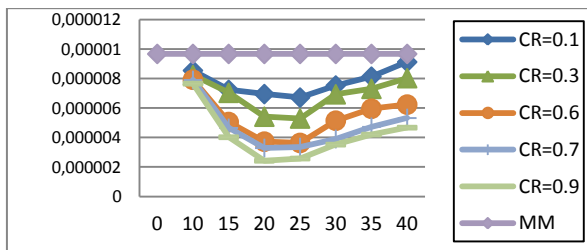


Figura 5. Máxima interferencia ISM vs factor  $s$

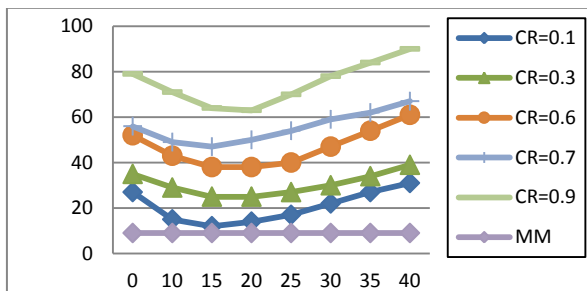


Figura 6. Número de iteraciones vs factor  $s$

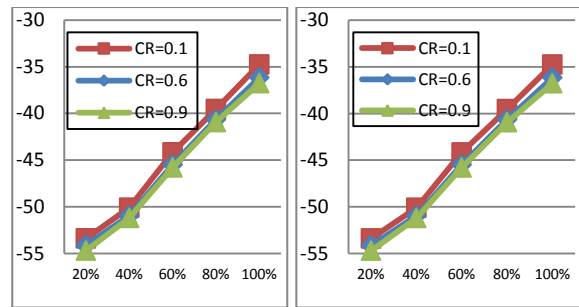


Figura 7. Máxima interferencia vs % de APs: a) ISM, b) PB

### 5.3. Desempeño del Algoritmo

Se analiza el rendimiento del algoritmo para diferentes porcentajes de llenado de APs en el escenario; en la Figura 8.a) y la Figura 8.b), se muestran respectivamente las curvas de máxima interferencia para ISM y PB vs porcentaje de llenado del escenario, con distintos valores de agrupaciones de APs, tomando los más relevantes para así realizar una comparación más eficiente de resultados.

### 5.4. Resultados Obtenidos

Como podemos observar, en la Figura 9.a) se muestra la Máxima Interferencia por porcentaje de APs en el escenario, que resulta de la asignación de canales de la banda ISM, observando detenidamente

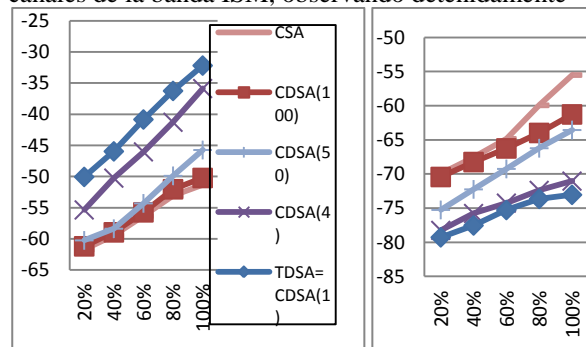


Figura 8. Máxima interferencia del escenario a distintas agrupaciones vs porcentaje de APs: a) ISM, b) PB

se tiene que a mayor tamaño de clusters (MSTs) en el escenario, los niveles de interferencia decrecen, esto se debe a que la comunicación entre APs involucra a una mayor cantidad de vecinos, terminando en un uso más eficiente de canales; al comparar los datos de esta figura con los de la Figura 9.b), la cual muestra la máxima interferencia del escenario en PB, se obtiene en cambio que una mayor coordinación entre APs vecinos genera un mayor uso de esta banda, esto es porque al tener una mayor concentración de APs, la asignación de canales en ISM se vuelve más limitada, y el uso de otros canales para poder mantener la interferencia en niveles bajos conlleva a usar una mayor cantidad de canales en PB, sin embargo los

niveles de interferencia calculados para una agrupación de todos los APs del escenario en un único cluster (CSA), o para agrupaciones de una cantidad fija de 100 APs por cluster (CDSA(100)) o de 50 APs por cluster (CDSA(50)), en comparación con los de una asignación totalmente aleatoria (RDM) o una lineal (MM), presentan una disminución considerable de interferencia, tal como se muestra en la Fig. 11, se obtuvo una mejora de 21dBm con CDSA(100) respecto de MM.

La Figura 10.a) presenta la sumatoria de interferencias (Potencia recibida/Potencia transmitida) del escenario en ISM vs porcentaje de APs, en la cual se aprecia de igual forma que con una mayor agrupación de APs estos logran mejorar sus niveles de interferencia en conjunto para el escenario.

La Figura 10.b), en donde la sumatoria de interferencias (Potencia recibida/Potencia transmitida) del escenario en PB vs porcentaje de APs, presenta valores bajos y cercanos entre los diferentes algoritmos, teniendo que para mayores agrupaciones los niveles de interferencia son mayores en comparación con agrupaciones en donde se involucra un único AP (TDSA), sin embargo se puede notar que aun para agrupaciones de 50 APs por cluster (CDSA(50)), el nivel total de interferencia en el escenario llega a ser mejor que los de una asignación totalmente aleatoria o una lineal.

Por último, en la Figura 11 se muestra el porcentaje de APs del escenario a distintos tamaños de clusters que utilizan PB, así se puede notar que a menor tamaño de clusters, el algoritmo coordinado y distribuido prioriza de mejor manera la utilización de la PB, sin embargo considerando valores altos de agrupaciones, el porcentaje de APs que utilizan PB no deja de presentar resultados satisfactorio.

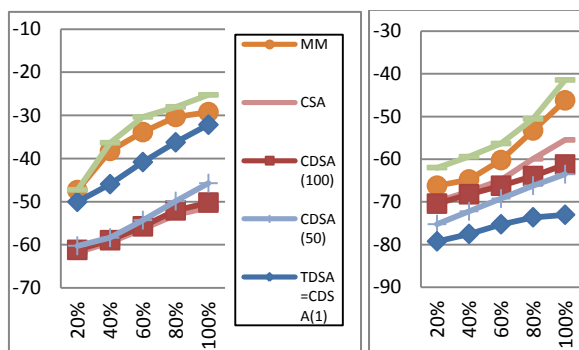


Figura 9. Máxima interferencia del escenario vs porcentaje de APs: a) ISM, b) PB

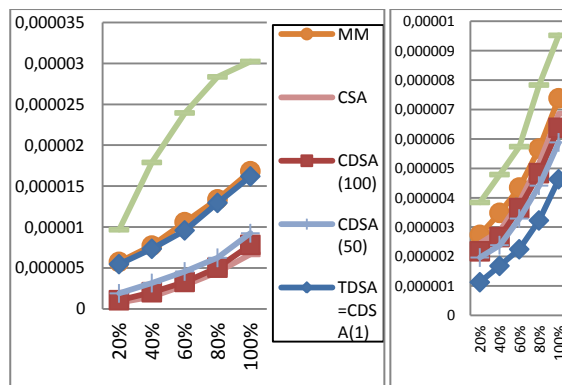


Figura 10. Sumatoria de interferencias del escenario vs porcentaje de APs: a) ISM, b) PB

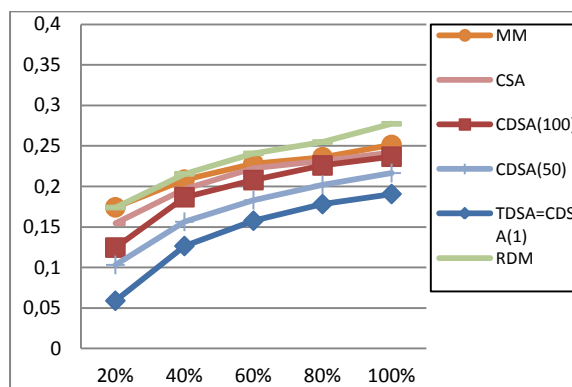


Figura 11. Porcentaje de APs en el escenario que utilizan PB vs porcentaje de APs

## 6. Conclusiones

En este trabajo, se logró que el algoritmo coordinado y distribuido mejore los niveles de interferencia en la banda ISM, a pesar de que a medida que la densidad de APs en el escenario aumentan, la utilización de la banda ISM también, a la vez que se prioriza su uso con respecto a la PB, logrando así mismo obtener bajos niveles de interferencia cuando los APs utilizaban PB, aun cuando la densidad de APs se incrementó.

También se demuestra que el algoritmo coordinado y distribuido encuentra mejores asignaciones de canales cuando la disponibilidad de los canales primarios aumenta. Se demuestra que el algoritmo coordinado y distribuido mejora al MinMax mediante el uso de MSTs tanto en ISM como en PB, realizando una mejor distribución de los canales en ambas bandas.

El análisis de interferencias tanto en ISM como en PB, y de la cantidad de APs que utilizan PB, ayudó a determinar que aunque una mayor agrupación de APs generaría una mejor asignación de canales en ambas bandas, en la vida real esto no resultaría tan óptimo, puesto que la utilización de agrupaciones con una mayor cantidad de APs como la de CDSA(100) resultaría muy costoso, sin embargo el considerar

agrupaciones un tanto menores de CDSA(50) sería más conveniente, puesto que al igual que la CDSA(100) presenta niveles muy buenos de interferencia en ISM, y mejora aún más los niveles de interferencia en PB.

## 7. Referencias

- [1] F. Novillo, M. Churchman, R. Ferrus y R. Agusti, «A channel Allocation Algorithm for OSA-Enabled IEEE 802.11 WLANs,» *Wireless Communication Systems*, p. 468, 2009.
- [2] W. El-Hajj y H. Alazemi, «Optimal Frequency Assignment for IEEE 802.11 Wireless Networks,» de *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 2008.
- [3] S. Chiochan, E. Hossain y J. Diamond, «Channel Assignment Schemes for Infrastructure-Based 802.11 WLANs: A Survey,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIAL*, vol. 12, n° 1, p. 128, 2010.
- [4] X. Yue, C.-F. Wong y S. H. G. Chan, «A Distributed Channel Assignment Algorithm for Uncoordinated WLANs,» de *IEEE CCNC*, 2010.
- [5] Z. Qing y S. Brian M., «A Survey of Dynamic Spectrum Access,» *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, pp. 79-89, May 2007.
- [6] F. Novillo y R. Ferrus, «Channel Assignment Algorithms for OSA-Enable WLANs Exploiting Prioritization and Spectrum Heterogeneity,» *IEICE TRANS. COMMUN*, Vols. %1 de %2Vol. E95-B, n° 4, pp. 1125-1134, 2012.
- [7] L. Chamorro y A. Barbosa, «Espectro abierto para el desarrollo, Estudio de caso: Colombia,» 2011.
- [8] M. Alvarado y M. Perona, «Estudio abierto para el desarrollo, Estudio de caso: Peru,» 2011.
- [9] F. Novillo, H. Galeana y R. Ferrus, «Spectrum Availability in Indoor Locations for Opportunistic Spectrum Access In Dense Urban Scenarios,» *IEEE 69th*, pp. 1-5, 2009.