



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“ALGORITMO DISTRIBUIDO COORDINADO DE ASIGNACIÓN DE  
CANALES PARA REDES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS  
CON ACCESO OPORTUNISTA”**

**TESINA DE SEMINARIO**

Previa la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

Fernando Renato Soriano Barzola

Diana Stephanie Urriola Estrada

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

## **AGRADECIMIENTO**

Al profesor guía, que con paciencia y dedicación a sus estudiantes, alienta el desarrollo de nuevos proyectos, PhD. Francisco Novillo.

## DEDICATORIA

A Dios, por todas nuestras conversaciones, y la tranquilidad que me da. A mi padre por no dejarme desistir, aun cuando creía que no se podía. A la Achi, por su amor, su apoyo incondicional y su paciencia. A mis abuelitos por hacerme barra. A mi hermano y mis hermanas. A Yumbo, fiel compañero. A Marilu, como siempre

*Fernando Soriano Barzola*

## DEDICATORIA

A mi padre Dimas por brindarme su apoyo en cada una de las etapas de mi vida, a mi madre Leonor por su dedicación y cariño, a mis hermanos Xavier y Marjorie por sus palabras alentadoras, a mi esposo Cesar por ser mi pilar en esta etapa, y a Dios por su guía en cada parte del camino.

A mis familiares que estuvieron pendientes de mis días en la culminación de mis días universitarios.

*Diana Urriola Estrada*

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

PhD. Francisco Novillo Parales

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

---

M.Sc. Carlos Valdivieso A.

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este informe de Seminario de Graduación, nos corresponde exclusivamente a nosotros; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Fernando Renato Soriano Barzola

---

Diana Stephanie Urriola Estrada

## RESUMEN

En la actualidad, las redes locales inalámbricas (WLANs por sus siglas en inglés) basadas en el estándar IEEE 802.11, son la alternativa con mayor aceptación de usuarios residenciales y corporativos. Esta tendencia, ha generado el incremento descoordinado de los puntos de acceso (AP) en zonas densamente pobladas, provocando el incremento en los niveles de interferencia entre APs puesto que estos operan en bandas no licenciadas (i.e. ISM). Otra consecuencia se reflejará en la degradación de los servicios brindados por las WLANs. Una alternativa para compensar esta problemática, radica en el uso oportunista de bandas licenciadas que no son explotadas en su totalidad.

Según lo expuesto, se propone descongestionar los canales de la banda ISM, implementando un mecanismo de asignación de canales de manera oportunista, aplicando el algoritmo probabilístico para la optimización global, conocido como 'Simulated Annealing'. Bajo este contexto, se realiza un proceso de asignación de costos y un análisis de niveles de interferencia, el mismo que ejecutamos para cada AP del escenario. El objetivo de este trabajo es conseguir una asignación óptima y 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.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO .....	II
DEDICATORIA .....	III
DEDICATORIA .....	IV
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	V
DECLARACIÓN EXPRESA .....	VI
RESUMEN.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ABREVIATURAS .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. MOTIVACIONES Y OBJETIVOS .....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4

1.3	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	5
1.4	ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	5
	CAPÍTULO 2.....	8
2.	ESTADO DEL ARTE .....	8
2.1	ACCESO OPORTUNISTA.....	9
2.2	OSA Y LA RADIO COGNITIVA .....	12
2.3	OSA EN TVWS.....	18
2.4	ESTANDAR 802.11af .....	20
2.5	REDES DE ÁREA LOCAL INALAMBRICAS (WLANS) .....	22
2.6	DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO PARA WLANS .....	26
2.7	ASIGNACIÓN DE CANALES.....	30
2.8	ALGORITMO SIMULATED-ANNEALING .....	32
	CAPÍTULO 3.....	34
3.	MODELADO DEL SISTEMA .....	34
3.1	DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.....	35
3.2	CONDICIONES DE USO DEL ESPECTRO .....	37
3.3	MODELO DE PROPAGACIÓN.....	38

3.3.1	PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN ENTRE AP Y AP.....	38
3.4	SOLAPE DE FRECUENCIA .....	39
3.5	MODELO DE INTERFERENCIA .....	43
3.5.1	DISTANCIA DE USO Y DISTANCIA DE INTERFERENCIA.....	43
CAPÍTULO 4.....		48
4.	PRESENTACION DEL ALGORITMO.....	48
4.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	49
4.2	FORMULACION MATEMÁTICA.....	50
4.3	SISTEMA DISTRIBUIDO COORDINADO .....	51
4.3.1	ETAPA DE COORDINACION.....	51
4.3.2	ETAPA DE ASIGNACIÓN .....	52
4.4	PSEUDOCÓDIGO .....	54
CAPÍTULO 5.....		57
5.	EVALUACIÓN DEL ALGORITMO.....	57
5.1	CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO .....	57
5.2	PARÁMETROS DE SIMULACIÓN .....	61
5.2.1	DETERMINACION DE FACTOR DE ENFRIAMIENTO.....	62
5.3	DESEMPEÑO DEL ALGORTIMO .....	65

5.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS .....	67
CONCLUSIONES .....	72
RECOMENDACIONES .....	74
BIBLIOGRAFÍA .....	75

## ABREVIATURAS

AP	Access Point
BSS	Basic Service Set
CR	Cooling Rate
CSA	Centralized Simulated Annealing
CDSA	Coordinated Distributed Simulated Annealing
DS	Distributed System
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DSA	Distributed Simulated Annealing
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical band
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSA	Opportunistic Spectrum Access
PU	Primary User
RC	Radio Cognitiva
SA	Simulated Annealing
SH	Spectrum Hole
STA	Station
TDSA	Total Distributed Simulated Annealing

TV	Television
TVWS	Television White Space
UHF	Ultra High Frequency
WLAN	Wireless Local Area Network
WS	White Space

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Esquema de la tesina .....	7
Figura 2.1 Clasificación de la técnica de Acceso Dinámico al Espectro .....	10
Figura 2.2 Esquema de las redes de Radio Cognitiva .....	17
Figura 2.3 Arquitectura de una red de área local inalámbrica.....	25
Figura 2.4 Superposición de canales en la banda ISM 2.4 GHz.....	29
Figura 2.5 Esquema de escenarios .....	31
Figura 3.1 Escenario de caso de estudio.....	36
Figura 3.2 Canalización OSA.....	40
Figura 3.3 Solape de frecuencia .....	41
Figura 3.4 Distancias de Uso e Interferencias entre APs.....	44
Figura 3.5 Distancia de interferencia entre un AP y PU.....	45
Figura 4.1 Esquema del sistema.....	50
Figura 4.2 Pseudocódigo .....	56
Figura 5.1 Canales de WLANs que pueden usar PB.....	61
Figura 5.2 Máxima interferencia ISM vs factor s .....	63
Figura 5.3 Numero de iteraciones vs factor s .....	64
Figura 5.4 Máxima interferencia ISM vs % de APs .....	64
Figura 5.5 Máxima interferencia PB vs % de APs.....	65

Figura 5.6 Máxima interferencia del escenario en ISM a distintas agrupaciones vs porcentaje de APs .....	66
Figura 5.7 Máxima interferencia del escenario en PB a distintas agrupaciones vs porcentaje de APs .....	66
Figura 5.8 Máxima interferencia del escenario en ISM vs porcentaje de APs .	68
Figura 5.9 Máxima interferencia del escenario en PB vs porcentaje de APs....	68
Figura 5.10 Sumatoria de interferencias del escenario en ISM vs porcentaje de APS.....	69
Figura 5.11 Sumatoria de interferencias del escenario en PB vs porcentaje de APS.....	70
Figura 5.12 Porcentaje de APs en el escenario que utilizan PB vs porcentaje de APs .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Resumen de los principales estándares de IEEE 802.11 .....	23
Tabla 2.2 Tabla de banda ISM.....	26
Tabla 2.3 Disponibilidad de canales por país .....	27
Tabla 2.4 Distribución de frecuencias de Canal.....	28
Tabla 5.1 Parámetros de configuración de infraestructura .....	58
Tabla 5.2 Parámetros de configuración de dispositivos .....	59
Tabla 5.3 Parámetros de Modelo de Propagación.....	60

## INTRODUCCIÓN

La creciente instalación de 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 (i.e. 11 en américa) que disponen para operar en la banda ISM. En este sentido mientras más usuarios sean desplegados sobre una cierta superficie, más congestión causarán a la banda asignada, lo que causará 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] Por otro lado, el control de 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 WLAN, 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 canales 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 del espectro. Sin embargo, estos mecanismos no brindan una mejora 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) [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 (i.e. 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.

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

Por lo tanto, en el presente trabajo se propone un algoritmo distribuido 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 (i.e. UHF), realizando una coordinación previa entre dispositivos WLANs. La coordinación se realizará mediante la construcción de Minimum Spanning Trees (MSTs) [9] entre APs cercanos, basados en niveles de interferencia.

Para la búsqueda del canal óptimo, ya sea en la banda ISM o UHF, se utiliza el algoritmo "Simulating Annealing", puesto que realiza un recorrido aleatorio y en base a probabilidades elige el canal candidato que genere la menor interferencia en la agrupación de APs.

En el capítulo 2 se describe la teoría del arte, donde se explica el fundamento teórico del caso de estudio. Luego, en el capítulo 3, se explica el modelado del sistema donde se describe el sustento matemático, incluyendo el modelo de propagación utilizado. El desarrollo del algoritmo se describe en el capítulo 4. En el capítulo 5, se concluye con los resultados obtenidos y comentarios

# **CAPÍTULO 1**

## **1. MOTIVACIONES Y OBJETIVOS**

En este primer capítulo, se describe la problemática que aqueja a los escenarios densamente poblados que operan en bandas no licenciadas y su relación directa con el incremento de los niveles de interferencia. Adicional, se establecen los objetivos y la justificación. Para finalizar, se especifica la estructura de los capítulos siguientes.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las redes locales inalámbricas (WLANs) se encuentran presentes en ambientes públicos y privados, donde el principal requerimiento de dispositivos móviles es el servicio de acceso a internet.

Debido a la demanda y a los bajos costos de producción [10], la mayoría de los dispositivos WLANs operan en la banda ISM de 2.4 GHz, y el descoordinado despliegue conlleva al incremento de los niveles de interferencia con otros dispositivos, esto sin contar con el incremento de la población de dispositivos, lo cual influiría en la degradación de los servicios de la red. Es característico situar esta densidad en zonas comerciales con aglomeración de empresas, así como dispositivos independientes en condominios.

Por lo antes expuesto, los mecanismos de asignación de canal son herramientas viables para minimizar los niveles de interferencia que se producen entre puntos de acceso (APs) cercanos, de manera que su rendimiento individual no sea afectado. Debido a esto, se han realizado estudios [1] [3], donde se dan varias alternativas para la optimización de los recursos espectrales.

A pesar del desarrollo de varios mecanismos de asignación de canales para mejorar el rendimiento de las WLANs, la mayor limitante en escenarios densamente urbanos es la escasez de canales disponibles en la banda ISM de 2.4 GHz, donde solo se cuentan con 3 canales sin solape de 11 disponibles.

Bajo estas circunstancias, se considera el uso de bandas adicionales para las WLANs (i.e. bandas exclusivas a las que se acceden oportunamente) con la finalidad de mejorar sus condiciones de interferencia. Este método de acceso es conocido como Acceso Oportunista al Espectro (OSA) [5] [11], y constituye un modelo de acceso dinámico al espectro que busca mejorar su utilización, permitiendo que un mayor número de usuarios compartan la banda bajo un esquema jerárquico donde usuarios secundarios (APs) y usuarios primarios (PU).

Cada Estado dispone de entes reguladores, quienes son los encargados de la asignación de bandas licenciadas, y muchas entidades mantienen concesiones exclusivas por largos periodos, como lo son las portadoras de servicios celulares o servidores de servicios de internet (ISP). Sin embargo, se ha comprobado que estas frecuencias no están siendo explotadas en su

totalidad, lo cual brinda un potencial uso oportunista de estas porciones de frecuencias conocidas como espacios en blanco (White Space, WS) [12].

Los primeros estudios referentes al uso de los espacios en blanco se centraron en la banda de televisión (TVWS) [13], el cual ya se encuentra regulado bajo el estándar 802.11af [14], y permite el uso de dispositivos WLAN para el uso oportunista.

## **1.2 OBJETIVOS**

Considerando las bondades del modelo OSA para que el rendimiento de las WLANs sea óptimo, los objetivos de nuestro trabajo proponen lo siguiente:

- Caracterizar el escenario para la asignación de canal para WLANs con capacidades OSA.
- Modelar los elementos de los diferentes sistemas.
- Proponer y desarrollar diferentes planteamientos para mecanismos óptimos de asignación de canal con acceso oportunista al espectro, basados en el algoritmo "Simulated Annealing".

- Evaluar los mecanismos propuestos en diferentes condiciones de disponibilidad de canal y porcentaje de APs desplegados en el escenario denso urbano.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Se propone distribuir y coordinar los APs desplegados en el escenario densamente poblado, mediante el desarrollo de un mecanismo de asignación de canales basado en el algoritmo Simulated Annealing con capacidades OSA, que permita minimizar los niveles de interferencia. Se debe considerar la heterogeneidad del espectro y disponibilidad de canales, tanto en banda primaria como en la banda ISM.

### **1.4 ESTRUCTURA DE LA TESINA**

Para este trabajo, se ilustra en la Fig. 1.1 la estructura que se sigue para su desarrollo. En el capítulo 2, se describen los conceptos teóricos de la técnica OSA y sus componentes. También, se define la arquitectura y componentes de las WLANs, y los diferentes mecanismos de asignación de canales. Para concluir, se describe el algoritmo Simulated Annealing.

En el capítulo 3, se describen el escenario, se definen los modelos de propagación e interferencia, y las condiciones de solapamiento espectral.

En el capítulo 4, se presenta el planteamiento del problema, la formulación matemática y el mecanismo de asignación de canales propuesto.

En el capítulo 5, se presenta la configuración del escenario y los parámetros de configuración.

Se finaliza con las conclusiones y recomendaciones.

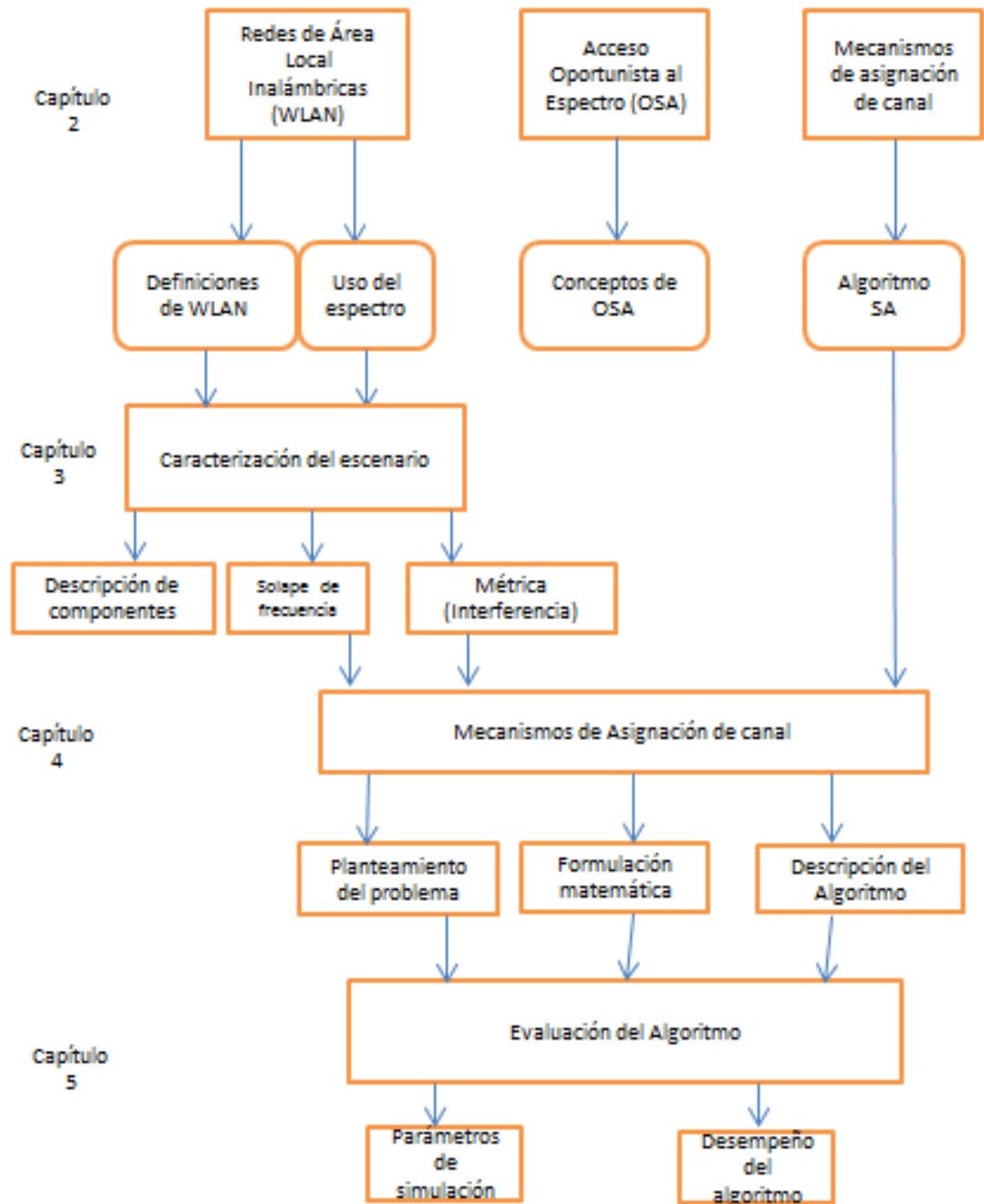


Figura 1.1 Esquema de la tesis

## **CAPÍTULO 2**

### **2. ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo revisaremos los conceptos y características de las tecnologías de Accesos Oportunista al Espectro (OSA) y Redes Locales Inalámbricas (WLAN). Así mismo, se analizarán los mecanismos de asignación de canales, y el funcionamiento del algoritmo Simulated Annealing.

## 2.1 ACCESO OPORTUNISTA

La implementación de sistemas de radio están agotando las frecuencias disponibles de esta banda. Los entes reguladores que manejan la disponibilidad del espectro, se basan en [5] donde la asignación es de manera estática para las frecuencias licenciadas. Pero en [15] se muestra que la disponibilidad del espectro varía de acuerdo al tiempo y la ubicación geográfica. Debido a esto, la reutilización de ciertas bandas licenciadas ha proporcionado estudios de políticas de manejo del espectro, y el desarrollo de técnicas de acceso.

De esta manera, introducimos el concepto de acceso dinámico al espectro (DSA), el cual permite explorar dinámicamente el espectro para el eficiente uso al momento de la asignación de canal. Esta técnica tiene tres modelos como se muestra en la Figura 2.1, y son brevemente descritos a continuación.

### **Modelo dinámico de uso exclusivo**

El modelo soporta la estructura básica de las políticas reguladoras del espectro, donde las frecuencias son licenciadas para servicios de uso exclusivo. Se busca introducir flexibilidad para mejorar la eficiencia del espectro, y para conseguirlo se proponen dos factores: los derechos de propiedad del espectro, y la asignación dinámica del espectro.

Por un lado, tenemos que los entes licenciados pueden vender e intercambiar su espectro, y escoger la tecnología de manera libre. Adicional, tienen la potestad de alquilar o compartir su espectro para beneficiarse, en este aspecto las políticas de regulación no impone restricciones.

El segundo aspecto es la asignación dinámica del espectro, la cual apunta al mejoramiento de la eficiencia del espectro a través de la explotación de las estadísticas de tráfico de diferentes servicios, de manera espacial y temporal. [5]

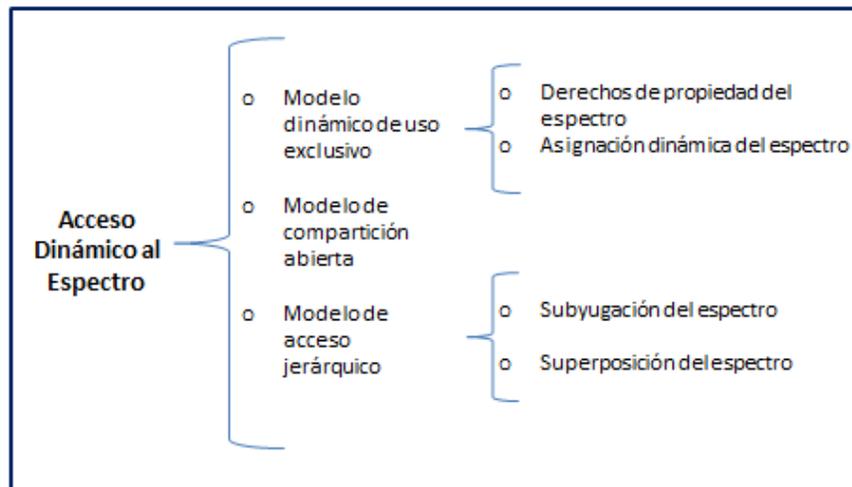


Figura 2.1 Clasificación de la técnica de Acceso Dinámico al Espectro

### **Modelo de compartición abierta**

El modelo es conocido como el espectro común. Este modelo emplea intercambio abierto entre los usuarios para la gestión de una porción del espectro. Los servicios inalámbricos que operan en la banda ISM son considerados un éxito por los seguidores de este modelo. Por esto, se han realizado estudios que sustentan que las estrategias de compartición se enfocan en el reto que representa el modelo de administración del espectro [5].

### **Modelo de acceso jerárquico**

El modelo determina una jerarquía de acceso para usuarios primarios y secundarios. Este propone abrir la banda licenciada a usuarios secundarios, y a su vez restringir la interferencia que los usuarios primarios causan. Para su análisis, se han propuesto dos planteamientos: la subyugación y la superposición del espectro. El enfoque subyacente restringe la potencia de transmisión de los usuarios secundarios, de tal manera que operan por debajo del umbral de ruido de los usuarios primarios [5].

## 2.2 OSA Y LA RADIO COGNITIVA

La primera propuesta de este modelo fue expuesta por Mitola [16], quien lo denominó "spectrum-pooling". Posteriormente, este fue analizado por el software DARPA Next Generation (xG), el cual lo denominó modelo OSA. Para que la coexistencia de las redes de los usuarios secundarios con el sistema de usuarios primarios sea factible, Mitola estableció que siempre se debe implementar un conjunto de procedimientos llamado ciclo cognitivo [17] de manera fiable por parte de los usuarios secundarios.

Es por esto, que la radio cognitiva (RC) es una herramienta que puede ser aplicada en diversas condiciones de las redes de radiocomunicación, y mediante la aplicación de técnicas cognitivas puedan mejorar su rendimiento. Es así como OSA se considera una aplicación relevante de la RC, ya que brinda la capacidad de compartir de manera oportunista el canal inalámbrico con usuarios licenciados [18].

La radio cognitiva consiste en un sistema de radio que puede modificar los parámetros del transmisor de acuerdo a lo que percibe del entorno en el que se encuentra operativo. Los dispositivos con capacidad RC se diferencian de los sistemas de radio tradicionales, debido a sus propiedades capacidad cognitiva y reconfigurabilidad [19].

La capacidad cognitiva permite que la radio cognitiva cense información del entorno del espectro, para encontrar porciones en desuso del espectro radio en un tiempo o espacio determinado. Luego, la frecuencia será seleccionada sin causar interferencias perjudiciales a otros usuarios. Mientras que la reconfigurabilidad implica que el espectro de radio debe ser debe cambiar dinámicamente de acuerdo a su entorno. La radio cognitiva puede cambiar parámetros como la frecuencia, la potencia, el esquema de modulación y protocolos de comunicación si afectar a sus componentes de hardware [20].

### **Componentes de red**

La arquitectura de la redes de radio cognitiva se clasifican en dos grupos: la red primaria y la red de radio cognitiva. La red primaria, o red licenciada, es una red existente donde los usuarios primarios (PU) tienen una licencia para operar, y se encuentran controlados por estaciones base primarias. Dada la prioridad, los usuarios primarios no deben ser afectados por usuarios sin licencia.

La red de radio cognitiva, también es conocida como red de acceso dinámico al espectro, red secundaria o red sin licencia, no cuenta con una

licencia para operar en alguna banda deseada [21]. Además, los usuarios de radio cognitiva deben contar con funcionalidades adicionales para su operación en bandas licenciadas. Estas redes también pueden contar con estaciones bases propietarias para la conexión de sus usuarios de manera directa.

### **Heterogeneidad del espectro**

Los usuarios de radio cognitiva son capaces de acceder a ambas tanto a bandas primarias usada por los usuarios primarios, como a bandas sin licencia a través de la tecnología de acceso de ancho de banda. [19]

Por lo tanto, los tipos de operación de la radio cognitiva se clasifica en: operación en banda licenciada, y operación en banda sin licencia.

La banda licenciada es primordialmente usada por la red primaria. En este caso, las redes de radio cognitiva se enfocan en la detección de PUs. La capacidad del canal depende en la interferencia cerca de los PUs. Si los PUs operan en la frecuencia que los usuarios secundarios están ocupando, entonces los usuarios secundarios deben moverse inmediatamente a otra frecuencia disponible.

En la ausencia de PUs, los usuarios secundarios tienen el mismo derecho de acceder al espectro. Sin embargo, son requeridos métodos de

compartición de espectro para los usuarios secundarios para competir por la banda licenciada. [22] [23]

### **Heterogeneidad de la red**

Para que la coexistencia de los usuarios secundarios y los usuarios primarios sea viable, basado en el ciclo cognitivo descrito en [20], se presentan las funciones de gestión del espectro para que usuarios de la banda secundaria puedan trabajar [19]: detección del espectro, decisión del espectro, uso compartido del espectro y la movilidad del espectro. El esquema de gestión propuesto se muestra en la Figura 2.2, y sus funciones serán descritas a continuación.

### **Detección del espectro**

Esta función determina la disponibilidad del espectro y detecta los usuarios primarios. De esta manera, se evitan las colisiones con usuarios primarios y la utilización de las bandas licenciadas. Para mejorar la probabilidad de detección de agujeros de espectro (SH), existen varias técnicas de detección de señal y se clasifican en: Detección del transmisor primario, detección del receptor primario, y Manejo de la temperatura de interferencia [18] [20].

### **Decisión de espectro**

La decisión del espectro se basa en disponibilidad de este, donde los usuarios de radio cognitiva eligen la mejor banda de frecuencia disponible para cumplir altos requisitos de calidad. Se analiza que cada agujero de frecuencia debe ser considerado tanto en variación de tiempo con respecto al entorno de la banda de frecuencia, así como la actividad de usuarios primarios. Para la elección de la banda apropiada para la transmisión deseada, se debe considerar los requerimientos de QoS y las características del espectro [20].

### **Uso compartido del espectro**

Este es el mayor reto del uso de espectro abierto. Existe el acceso coordinado con otros usuarios. Sus diversos aspectos son: arquitectura, comportamiento de asignación del espectro, acceso al espectro y alcance.

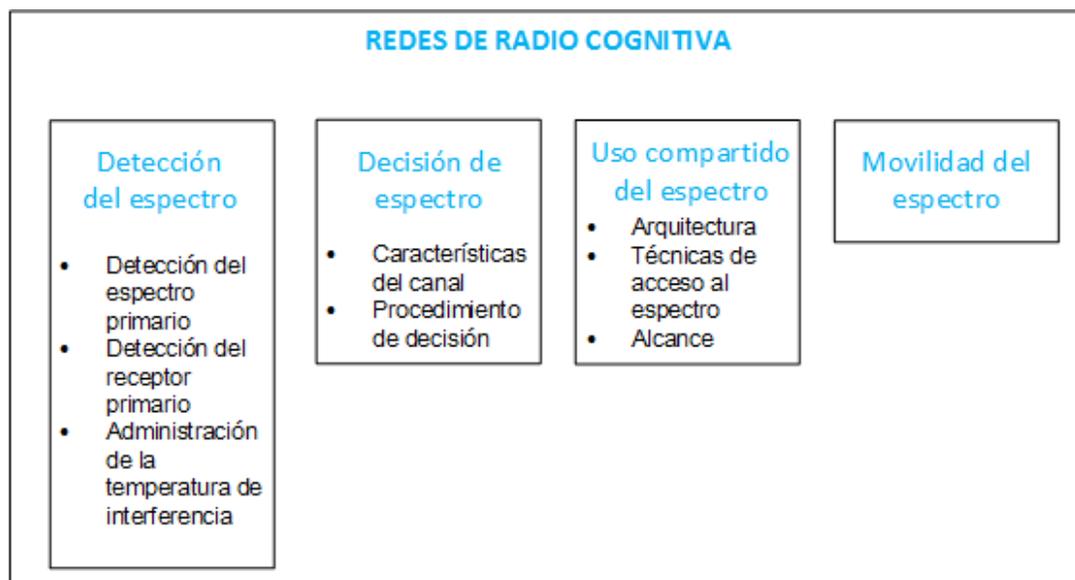


Figura 2.2 Esquema de las redes de Radio Cognitiva

La arquitectura puede ser centralizada o distribuida. De manera centralizada, la asignación del espectro y los procesos de acceso son controlados por un ente central. Mientras que forma distribuida, la asignación y el acceso se encuentran apegadas a las políticas de la región, y que se realizan en cada nodo de manera distribuida [24].

El comportamiento de asignación del espectro se divide en cooperativo y no cooperativo. Para la primera categoría, el efecto de interferencia se considera en un nodo contra otros nodos, a diferencia del no cooperativo

que considera un nodo aislado ignorando la interferencia del resto de nodos [19].

Para concluir, el alcance tiene dos soluciones: la cohabitación entre varias redes RC nombrado uso compartido del espectro de conexión interna de comunicación, y la compartición del espectro dentro de una red RC nombrado uso compartido del espectro de intranet [18].

### **Movilidad de espectro**

En este proceso, la radio cognitiva cambia su frecuencia de operación para utilizar el espectro de manera dinámica, para operar en la mejor banda de frecuencia disponible. Cuando los usuarios primarios aparecen, la condición del canal elegido empeora y es cuando aparece la movilidad del espectro, para que se cambie a otra banda de frecuencia disponible [20].

## **2.3 OSA EN TVWS**

OSA es una técnica de uso compartido del espectro que permite el uso sin licencia de las porciones de banda licenciadas subutilizadas sin afectar a los usuarios primarios. Estos segmentos son conocidos como espacios en blanco (WS) [25].

Varios estudios han expuesto que es un hecho que ciertos segmentos del espectro electromagnético son subutilizados, y corresponden a servicios de televisión que en ciertas ubicaciones geográficas algunos canales no están siendo utilizados [26] [27]. Estas porciones del espectro de TV son denominados Espacios en Blanco de TV (TVWS).

El acceso oportunista a espacios en blanco de usuarios secundarios comprende la detección de WS disponibles en bandas licenciadas (i.e. UHF) y el uso de esa frecuencia de espectro basada en los lineamientos establecidos por los entes reguladores, quienes brindan la protección de PUs de interferencias dañinas.

Para encontrar WS, los usuarios secundarios pueden usar varios mecanismos cognitivos que han sido propuestos por algunos entes reguladores. Así en [28] [29], se discuten los mecanismos de geolocalización con bases de datos, la detección de espectro y señal de baliza, donde se reconoce que constituyen la principal tecnología para el acceso oportunista a bandas de TV. La detección de espectro ha sido descrita en la sección 2.2.

La geolocalización con bases de datos es un método, donde los usuarios secundarios consultan una base de datos para establecer si hay disponibilidad de TVWS en áreas aledañas, que puedan utilizarse sin causar interferencia a otros servicios [30].

La señal de baliza es otro mecanismo usado para la detección de WS en el espectro. Los usuarios secundarios pueden solo transmitir en un canal si previamente han recibido la señal de baliza con información si ese canal se encuentra disponible [26] [28].

#### **2.4 ESTANDAR 802.11af**

La investigación de diversas aplicaciones que utilizan el modelo OSA, ha generado varias acciones sobre el uso de TVWS. Es así, que el estándar IEEE 802.11af [14] [31] fue sugerido para la operación en ambientes con conexión inalámbrica de corto alcance sobre espacios en blanco de televisión. Haciendo uso de la tecnología Wi-Fi dentro espacios en blanco de TV, aplicando la tecnología de radio cognitiva, se concibe el concepto White-Fi. Para el uso de TVWS por los dispositivos IEEE 802.11af, se requiere que estos no causen interferencia a los PUs.

Debido a que los dispositivos IEEE 802.11af [14] operan en frecuencias por debajo de 1 GHz, para el uso de TVWS, las condiciones de propagación denotan una mejoría, ya que las señales son absorbidas fácilmente y se amplía el rango de cobertura de las señales transmitidas si se compara con el actual 802 operativo en 2.4 GHz. Para brindar servicios similares a la tecnología Wi-Fi, con respecto a las tasas de transmisión de datos, se debe disponer de varios canales de TV [31].

En el 2011, se incorpora el concepto de radio cognitiva en el primer estándar de interfaz aéreo, IEEE 802.22, conocido como estándar para Redes de Áreas Regionales Inalámbricas (WRANs). Se planeó para su operación en bandas de TV (UHF o VHF), que estén disponibles entre 54 y 862 MHz, pero las políticas de la FCC restringe el uso a las frecuencia por debajo de los 698 MHz. La norma incluye canales de ancho de banda de 6, 7 y 8 MHz, ya que son compatibles con varios estándares de televisión a nivel mundial [32] [33].

## 2.5 REDES DE ÁREA LOCAL INALÁMBRICAS (WLANS)

Una red inalámbrica es un sistema de comunicación de datos, donde dos o más dispositivos con interfaz inalámbrica pueden transmitir y recibir datos usando ondas de radio o luz infrarroja en un medio no guiado.

Dada su naturaleza, donde la conexión es en ausencia de cables, es una alternativa que ha tenido una gran aceptación durante los últimos años, ya que permite la movilidad de los dispositivos, e inclusive la interoperabilidad con computadores que estén conectados a redes cableadas. [34] La principal desventaja es la seguridad, ya que se encuentra vulnerable a intrusos.

La tecnología utilizada por las WLANs se basa en las especificaciones de la IEEE 802.11, que fue desarrollado por el Comité de Normas LAN/MAN (IEEE 802), y que comúnmente se lo conoce como Wi-Fi. Las especificaciones del estándar definido por el IEEE nombrado 802.11x, debido a que x comprende las letras que identifican las variantes de la norma (i.e. 802.11b), abarcan las capas física, la subcapa de acceso al medio (MAC) de la capa de enlace del modelo OSI [34]. La especificación 802.11 se ratifica como estándar en el año 1997, versión que provee servicios de transmisión de datos de 1 Mbps y 2 Mbps, ya que operan en la banda ISM de 2.4 GHz. [35]

Para el año 1999, los estándares para WLAN IEEE 802.11b y 802.11a se habían aprobado. La propuesta IEEE 802.11b trabaja en la banda de 2.4 GHz con una máxima tasa de transmisión de 11 Mbps, usando la técnica de modulación de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS). Por otro lado, el IEEE 802.11a opera en la banda de 5 GHz, con una tasa de transmisión de datos de 54 Mbps usando la técnica de modulación de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), que utiliza múltiples señales portadoras a distintas frecuencias, enviando algunos de los bits en cada uno de los canales [34] [35] [36]. A continuación, en la tabla 2.1 se presentan las variantes del estándar.

Tabla 2.1 Resumen de los principales estándares de IEEE 802.11

	<b>802.11</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11a</b>	<b>802.11g</b>	<b>802.11n</b>
<b>Año de aprobación</b>	1997	1999	1999	2003	2009
<b>Máxima tasa de transmisión de datos (Mbps)</b>	1.2	11	54	54	600
<b>Técnica de Modulación</b>	DSSS	DSSS	OFDM	DSSS, OFDM	DSSS, OFDM
<b>Banda de operación (GHz)</b>	2.4	2.4	5	2.4	2.4 , 5
<b>Ancho de Banda (MHz)</b>	20	20	20	20	20, 40

## **COMPONENTES Y ARQUITECTURA**

La WLANs basadas en el estándar IEEE 802.11, se componen de varios componentes para su funcionamiento. Para comenzar, tenemos a las estaciones (STA), que son los dispositivos con interfaz de red que se conectan a la WLAN. El STA es un ente lógico de direccionamiento individual de una interfaz de control de acceso al medio y la capa física para el medio inalámbrico, donde se genera y se recibe un mensaje [35].

El punto de acceso (AP) es un ente que integra un STA y brinda acceso a los servicios de distribución por el medio de transmisión inalámbrico para los STAs asociados [35] [36].

El estándar IEEE 802.11 posee una arquitectura que consta de varios componentes que interactúan entre sí, para que una WLAN ofrezca la movilidad de los STAs de forma transparente a las capas superiores. De esta manera, se introduce el concepto de Conjunto de Servicios Básicos (BSS). Este es considerado el bloque de construcción básica de una LAN basada en IEEE 802.11. En la Figura 2.3 se muestra un BSS, donde los óvalos describen el área de cobertura donde los STAs pueden mantener

la comunicación. La infraestructura BSS es cuando se construye un BSS alrededor de un AP dedicado a la gestión de la BSS [35].

El Sistema de Distribución es un sistema usado para una conexión interna entre APs, donde un grupo de BSSs y WLANs integradas crean un conjunto de un conjunto de servicios extendidos (ESS). [35]

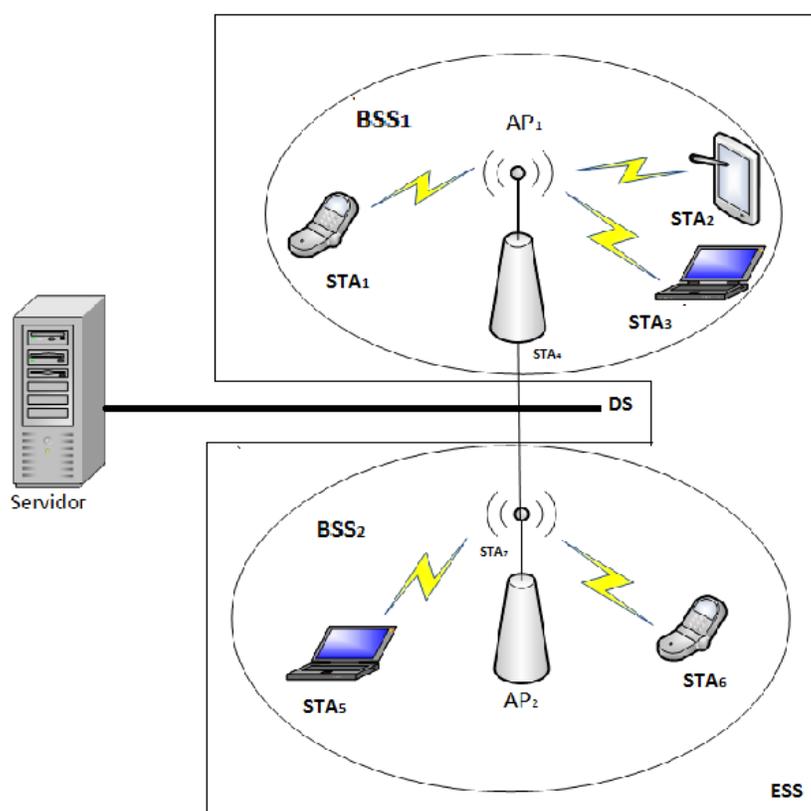


Figura 2.3 Arquitectura de una red de área local inalámbrica

## 2.6 DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO PARA WLANS

Como antes se mencionó, las WLANs operan en la banda industrial, científica y médica sin licencia (ISM) en las frecuencias de que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Tabla de banda ISM

Banda	Rango
900 MHz	902-928 MHz
2.4 GHz	2.4 - 2.4835 GHz
5 GHz	5.15-5.35, 5.725-5.825 GHz

Estas bandas de frecuencia presentan distintos comportamientos. La operación en bajas frecuencias brinda un mejor rango de cobertura, aunque el ancho de banda es limitado, por lo tanto tiene menor tasa de datos. Por otro lado, la operación en altas frecuencias disminuye el rango de cobertura de la red puesto que están sujetas a mayores atenuaciones causadas por presencia de objetos.

Para la banda ISM de 2.4 GHz, se establecen 14 canales de operación, cantidad que difiere en cada país, debido a las políticas reguladoras de asignación de frecuencias. En la tabla 2.3 se muestra los canales

permitidos por la FCC en Estados Unidos de Norteamérica (USA), y los establecidos por la ETSI en Europa [36].

Tabla 2.3 Disponibilidad de canales por país

Canal	Estados Unidos	Europa	Japón
1	Si	Si	Si
2	Si	Si	Si
3	Si	Si	Si
4	Si	Si	Si
5	Si	Si	Si
6	Si	Si	Si
7	Si	Si	Si
8	Si	Si	Si
9	Si	Si	Si
10	Si	Si	Si
11	Si	Si	Si
12	No	Si	Si
13	No	Si	Si
14	No	No	802.11b

El estándar WLAN IEEE 802.11 decreta que la separación de los canales es de 5 MHz, con excepción de los dos últimos ya que cuentan con una separación de 12 MHz, y un ancho de banda de 22 MHz, como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Distribución de frecuencias de Canal

Canal	Frecuencia Baja (MHz)	Frecuencia Central (MHz)	Frecuencia Alta (MHz)
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483
14	2.473	2.484	2.495

Considerando las características antes descritas, los canales adyacentes presentan superposición, motivo que causaría interferencia si dispositivos operan en canales adyacentes. Para minimizar las condiciones de interferencia, las frecuencias centrales de los dispositivos deben tener una separación de al menos 25 MHz para su operación simultánea [36] [37].

Basados en las condiciones de solapamiento entre canales, el máximo número de canales sin solape es tres. En USA, la FCC determinó que solo

se encuentran operativos 11 canales para las WLANs, de esta manera los canales sin solape serían el 1, 6 y 11, como se muestra en la Fig. 2.5.

También se define una máscara de frecuencia que especifica la distribución de potencia permitida en cada canal, estableciendo los niveles de energía máxima que el transmisor puede emitir en una frecuencia dada., La energía debe ser 30 dB menor que el nivel de señal máxima a los 11 MHz de distancia de la frecuencia central, y 50 dB por debajo del nivel máximo a los 22 MHz de distancia de la frecuencia central. A medida que se aleja de la frecuencia central, caen los niveles de energía, pero existe un porcentaje de energía presente que puede provocar interferencia en algunos canales [35] [36] [37].

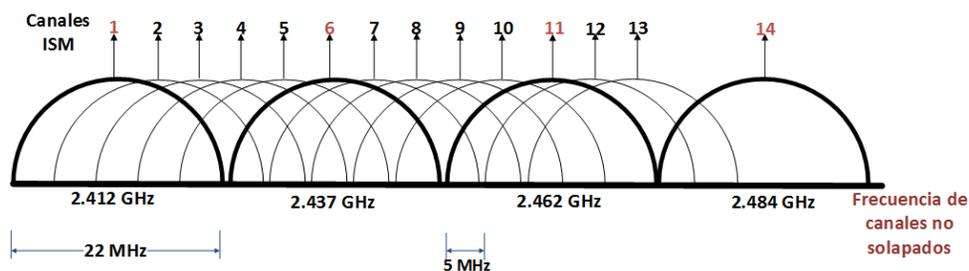


Figura 2.4 Superposición de canales en la banda ISM 2.4 GHz

## 2.7 ASIGNACIÓN DE CANALES

La implementación de WLANs basadas en el estándar IEEE 802.11 ha tenido un gran incremento en zonas densas urbanas. Por lo que las WLANs han experimentado problemas como la congestión de la banda ISM, y se buscan mecanismos que permitan mejorar su rendimiento. Por lo tanto, se consideran mecanismos de asignación de canales, que consisten en la asignación de frecuencias a cada AP para que operen.

Existen dos tipos de despliegues de redes WLAN: coordinados o no coordinados. Para los despliegues coordinados, el monitoreo y el manejo de la información del entorno de las WLANs (APs, STAs) las realiza un ente central. Este escenario se lo conoce como operación centralizada, en donde el ente central puede ejecutar los mecanismos para solucionar el problema de asignación de canales [3].

Para los despliegues no coordinados no existe una entidad de control central, y cada AP solo conoce su propia información, y no la de otros APs [38]. Por lo cual, el problema de asignación de canales solo puede ser realizado por cada AP, y este escenario se conoce como computo distribuido. Un ejemplo característico es el despliegue de redes WLAN en sectores residenciales, donde la asignación de canales es realizada de

manera aleatoria y empírica. Dada la sobrepoblación de APs que proponemos en este estudio, el solape de los canales causará interferencia entre los APs que están operando en canales adyacentes.

En la Figura 2.5 se muestra el esquema de los despliegues antes descritos.

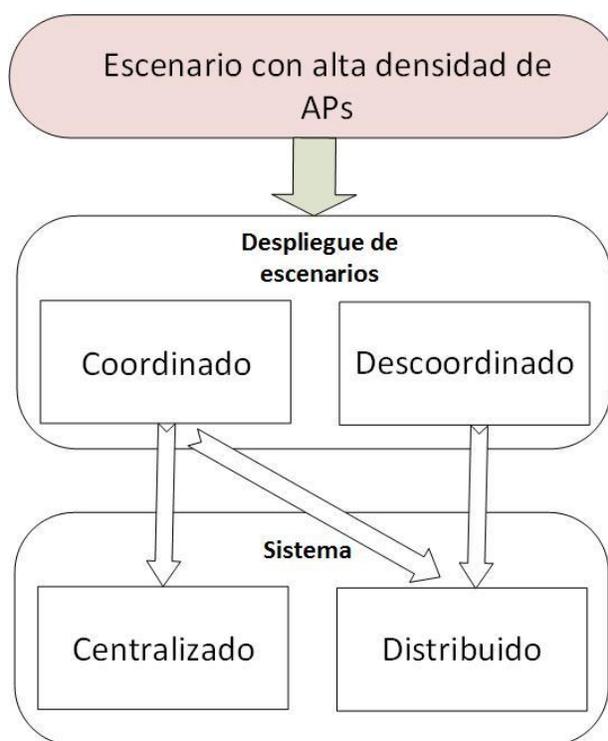


Figura 2.5 Esquema de escenarios

Varias técnicas han sido propuestas para gestionar este tipo de problemas de rendimiento. Para despliegues de gestión centralizada, la técnica de control de asociación o equilibrio de carga, asocia los STAs con los APs

para nivelar el tránsito en cada red por medio de un ente principal [39]. Por otro lado, para despliegues no coordinados se utilizan mecanismos de control de potencia [40] [41], en la cual la potencia de transmisión se sintoniza dinámicamente.

De igual manera, se debe considerar si la asignación de canal es de orden estático o dinámico [3]. En el primer caso se examina la asignación de canales para el despliegue original de las redes WLAN; mientras que en el segundo se valora la reasignación o ajuste del canal.

## **2.8 ALGORITMO SIMULATED-ANNEALING**

Simulated Annealing (SA) es un algoritmo probabilístico que permite resolver problemas de optimización [42]. Su fundamento se compara con un proceso termodinámico, conocido como recocido simulado, que estabiliza a ritmo lento el proceso de enfriamiento de una sustancia desde su estado líquido hasta su estado sólido. En el año 1983, S. Kirkpatrick et al. [43] introduce el concepto SA para brindar una solución óptima a problemas de graph partitioning [44] y diseño de VLSI.

La comparación se realiza analizando un resultado del problema de optimización como un estado sólido-líquido estable, comprendiendo que la

energía que está siendo disminuida en el proceso termodinámico, concuerda con la función objetivo del problema a solucionar.

El método recorre el espacio de búsqueda del problema de optimización disminuyendo progresivamente el valor de la función objetivo. Partiendo de esta solución, se examina la próxima solución la cual siempre se aprueba en el mejor escenario; y esporádicamente se elige si es peor que la actual solución basada en una función de probabilidad determinada como la función de probabilidad de Boltzmann en este escenario.

. El algoritmo cuenta con dos bucles, por un lado el bucle interno regula la disminución de la temperatura, mientras que el bucle externo ejecuta una búsqueda local aleatoria a una temperatura dada. [45]

## **CAPÍTULO 3**

### **3. MODELADO DEL SISTEMA**

En este capítulo se presentan las características del modelado del escenario para la implementación del mecanismo de asignación de canal propuesto en el capítulo 2. Se presentan las características del modelo de propagación, y el modelo de interferencia entre los componentes del escenario.

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

Para el modelado del sistema se requiere nos situamos en un escenario urbano densamente poblado, con gran cantidad de edificios tipo Manhattan [46], donde tenemos una alta concentración de APs. Las estaciones base (PB) que se encuentran situadas sobre el techo de los edificios esquineros del escenario, son las antenas de transmisión de televisión terrestre (UHF). La asignación de los canales es aleatoria.

La Fig. 3.1 muestra el escenario donde se encuentran  $n_a$  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.

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.

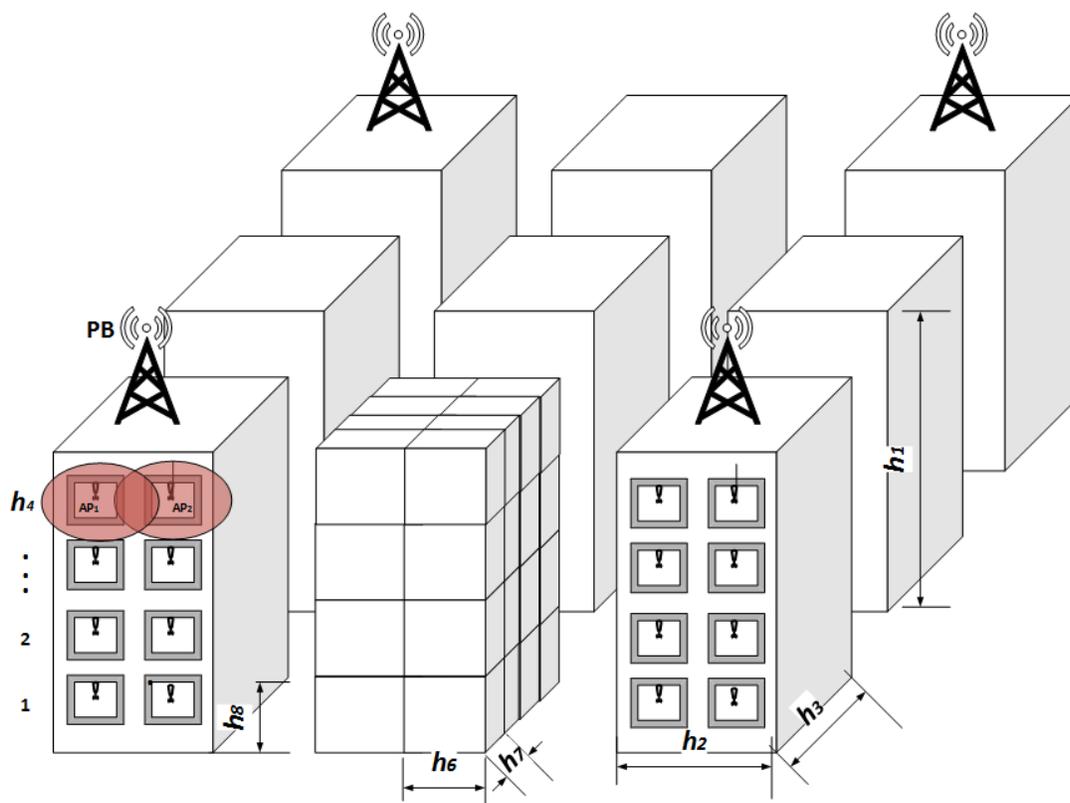


Figura 3.1 Escenario de caso de estudio

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 primaria. Debido a que los canales UHF son concesionados, su uso es exclusivo y esta banda la denominaremos banda primaria (PB). Con el uso oportunista de los canales de la PB, se pretende minimizar los niveles de interferencia entre APs.

Las estaciones base de banda primaria o usuarios primarios (PU) se encuentran ubicadas en los edificios esquineros del escenario. El canal de operación de las PBs es asignado aleatoriamente.

### 3.2 CONDICIONES DE USO DEL ESPECTRO

Las condiciones que determinan la reutilización del espectro se formulan en términos de los niveles de interferencia permitidos en los receptores primarios y secundarios, de esta manera los usuarios secundarios (APs) puede reutilizar la banda primaria sin perturbar a los usuarios primarios.

Un AP puede usar un canal de banda primaria cuando la interferencia que percibe cualquier receptor primario,  $I_{AP \rightarrow PU}$  [36], es menor que la sensibilidad  $S_{PU}$  del transmisor primario menos el margen de protección dado  $M_{PU}$ , y esta condición impuesta a los APs cuando transmiten se formula como:

$$I_{AP \rightarrow PU} \leq S_{PU} - M_{PU} \quad (3.1)$$

De manera paralela, los APs deben cumplir con la condición de que la interferencia recibida de un transmisor primario,  $I_{PU \rightarrow AP}$ , debe ser menor que la sensibilidad del AP  $S_{AP}$  menos el margen de protección  $M_{AP}$ , y esta

condición impuesta a los APs cuando están en modo de receptor se formula como:

$$I_{PU \rightarrow AP} = S_{AP} - M_{AP} \quad (3.2)$$

### 3.3 MODELO DE PROPAGACIÓN

Para determinar el comportamiento de los APs en el escenario, nos basamos en los niveles de interferencia que estos perciben, bajo un umbral permitido para su operación óptima. Es por esto, que a continuación describimos el modelo de propagación utilizado para este caso de estudio.

#### 3.3.1 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN ENTRE AP Y AP

Debido a que los APs se encuentran ubicados solamente en el interior de los edificios, consideramos las pérdidas en la trayectoria, tanto en el interior como el exterior. Por lo tanto, se utiliza el modelo de propagación COST 231 [46], el cual se aplica a continuación:

$$L = L_o + 10\alpha \log_{10} d_{ap_m, ap_n} + L_M \quad (3.3)$$

Donde  $L_M$  es la constante de pérdida debido a los materiales. La constante de pérdida en espacio libre  $L_o$  está definida en la ecuación (3.4):

$$L_o = 10 \alpha \log_{10}(41.9f) \quad (3.4)$$

Donde  $\alpha$  es el gradiente del medio (3.5), y  $f$  es la frecuencia de operación del AP. En la ecuación (3.3) se define a  $d_{ap_m, ap_n}$  como la distancia de un  $ap_m$  a un  $ap_n$ .

$$L_M = \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right]} L_f \quad (3.5)$$

En la ecuación (3.5),  $L_{wi}$  es la pérdida por tipo de pared  $i$ ,  $L_f$  es la pérdida entre pisos adyacentes,  $k_{wi}$  es el número de paredes penetradas de tipo  $i$ ,  $k_f$  es el número de pisos penetrados,  $b$  es un parámetro empírico fijado en 0.8.

### 3.4 SOLAPE DE FRECUENCIA

Los conjuntos de canales que podrían ser usados por cualquier AP están dados por  $S(AP_k)$  y  $P(AP_k)$  en la banda ISM y en la banda UHF respectivamente. Por lo que el rango de canales disponibles para un AP en particular va desde  $S(AP_k)$  hasta  $S(AP_k) + P(AP_k)$ .

El uso del espectro de los usuarios primarios es diferente al de los usuarios secundarios, puesto que la máscara de transmisión en UHF (6 MHz) es diferente a la máscara en WLAN (22 MHz). Con la finalidad de transmitir correctamente las señales de los usuarios secundarios que utilizan de manera oportuna un canal de banda primaria, el canal utilizado por un AP está formado por un conjunto de canales primarios para igualar la máscara del estándar 802.11, como se muestra en la Figura 3.2. En el escenario propuesto, hay cuatro usuarios primarios que estarán transmitiendo un subconjunto aleatorio de canales UHF sin solape, mientras que los canales en los APs se asignarán según el mecanismo de asignación de canal presentado en el capítulo siguiente.

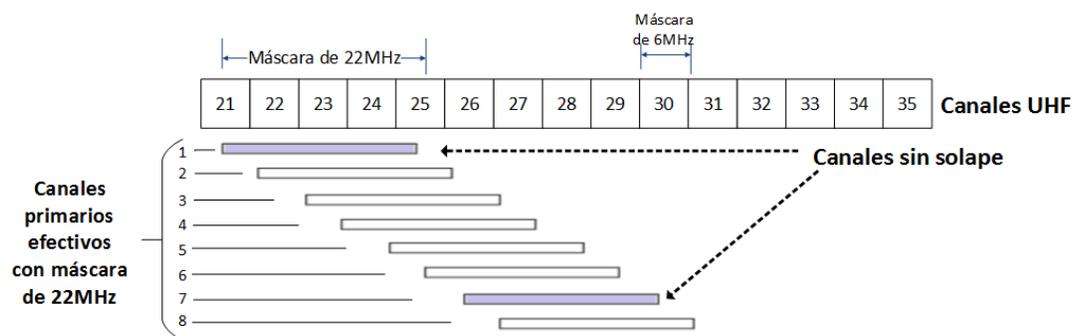


Figura 3.2 Canalización OSA

Existe un factor que cuantifica la interferencia provocada por una señal entrante centrada en una frecuencia  $f_i$  en un filtro receptor centrado en

una frecuencia  $f_j$ . El solapamiento de frecuencia se calcula cuantitativamente como el área de intersección entre la densidad espectral de potencia del transmisor  $P_I(f)$  y la respuesta de frecuencia paso bajo del receptor  $H_R(f)$ , como se muestra en la Figura 3.3.

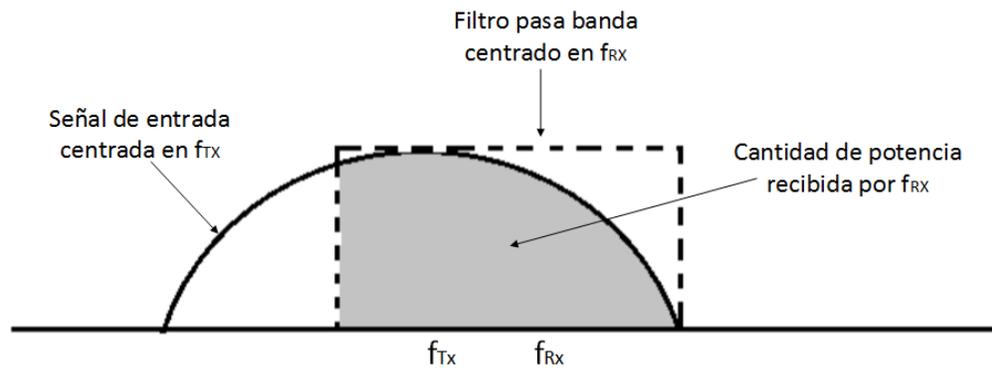


Figura 3.3 Solape de frecuencia

La potencia normalizada recibida en la salida del filtro receptor se lo llama factor de interferencia por solapamiento  $\rho$ , y puede ser determinada mediante la expresión:

$$\rho_{I \rightarrow R^j} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_1(f) \cdot |H_R(f - |f_i - f_j|)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_1(f) df} \quad (3.6)$$

donde  $i$  y  $j$  son los índices pertenecientes a la frecuencia de los canales utilizados correspondientes con el dispositivo que pretende interferir  $I$  y el dispositivo receptor  $R$ . Este factor puede utilizarse para todo tipo señales

de banda restringida sin que se considere su modulación, y adicionalmente, se lo puede utilizar entre dispositivos de igual o distinta tecnología inalámbrica.

El cálculo del factor de interferencia por solape se determina para dos casos diferentes:

Caso 1:  $\rho_{AP^i \rightarrow PU^j}$ , para un transmisor interferente AP, usando un canal utilizado por PU:

$$\rho_{AP^i \rightarrow PU^j} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{AP}(f) \cdot |H_{PU}(f - |f_i - f_j|)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{SU}(f) df} \quad (3.7)$$

Caso 2:  $\rho_{AP^i \rightarrow AP^j}$ , para representar la interferencia entre dos dispositivos WLAN operando con canales solapados tanto en banda ISM como en la banda UHF:

$$\rho_{AP^i \rightarrow AP^j} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{AP^i}(f) \cdot |H_{AP^j}(f - |f_i - f_j|)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{AP^i}(f) df} \quad (3.9)$$

### 3.5 MODELO DE INTERFERENCIA

Para este estudio, cada AP cuenta con  $i$  canales de la banda ISM, y  $p$  canales de la banda primaria (UHF).

#### 3.5.1 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 que pueden recibir a otros, esta distancia se denomina distancia de uso.

La distancia en la que un dispositivo, transmite un canal determinado, y este 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 APs, se determina mediante:

$$D_{I_{AP1 \rightarrow AP2}} = D_{U_{AP1}} \left( 1 + 10^{\left( \frac{M_{AP} - \Delta_{AP1, AP2}}{10\alpha} \right)} \right), \forall \rho_{2,1} > 0 \quad (3.10)$$

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:

$$\Delta_{AP_1,AP_2} = -10 \log(\rho_{AP_1,AP_2}) \quad (3.11)$$

$\rho_{AP_1,AP_2}$  es el factor de interferencia por solape de canal, definido en la ecuación (3.9). En la Figura 3.4 se muestra la distancia de uso de los APs, y la distancia de interferencia entre dos APs.

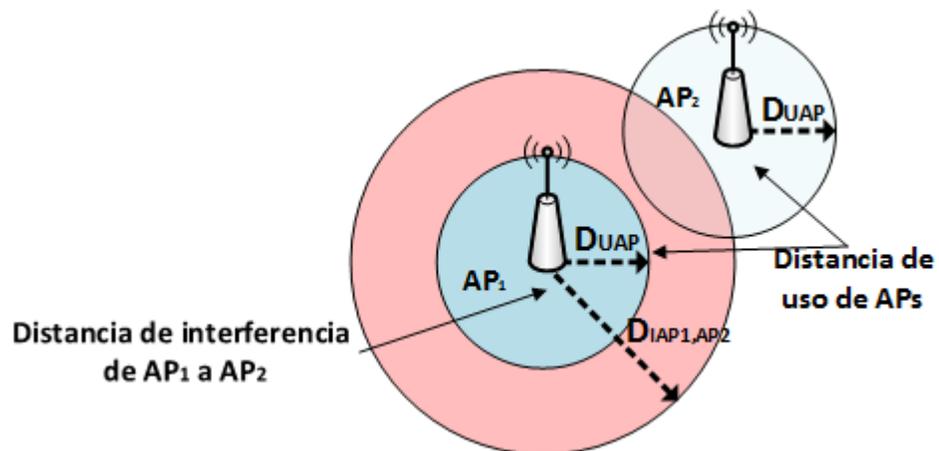


Figura 3.4 Distancias de Uso e Interferencias entre APs

### ***DISTANCIA DE INTERFERENCIA AP Y PU***

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

$$D_{I_{AP \rightarrow PU}} = D_{U_{AP}} \left( 1 + 10^{\left( \frac{S_{AP} - S_{PU} + M_{AP} - \Delta_{PU, AP} - L_M}{10\alpha} \right)} \right)$$

$$, \forall \rho_{2,1} > 0 \quad (3.12)$$

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, como se muestra en la Figura 3.5.

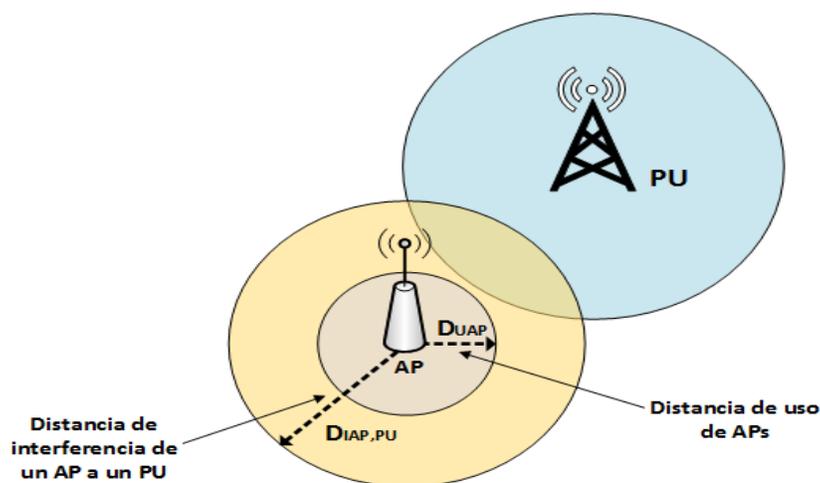


Figura 3.5 Distancia de interferencia entre un AP y PU

### ***INTERFERENCIA ENTRE AP Y AP***

Para que exista interferencia entre un AP y otro AP, primero se debe cumplir que la distancia de interferencia del AP<sub>1</sub> alcance o supere la distancia de uso del AP<sub>2</sub>. El nivel de interferencia que percibe un AP desde cualquier otro AP, se describe a continuación:

$$I_{AP1 \rightarrow AP2} = P_{TxAP1} - L_{AP1,AP2} - \Delta_{AP1,AP2} \quad (3.13)$$

donde,  $P_{TxAP1}$  es la potencia a la que transmite el AP<sub>1</sub>;  $L_{AP1,AP2}$  es la pérdida de trayectoria de la señal desde el AP<sub>1</sub> al AP<sub>2</sub> en ISM o UHF, y  $\Delta_{AP1,AP2}$  es el factor de pérdida de solape por canal entre APs, que se calcula de manera similar a la ecuación (3.11).

### ***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:

$$I_{AP \rightarrow PU} = P_{TxAP} - L_U - \Delta_{AP,PU} \quad (3.14)$$

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 ecuación (3.11).

## **CAPÍTULO 4**

### **4. PRESENTACION DEL ALGORITMO**

En esta sección se plantea el problema de la interferencia entre dispositivos WLAN, como un problema de falta de coordinación en la asignación de canales. Se presenta la formulación matemática que respalda el análisis del escenario, la descripción del algoritmo propuesto en este trabajo, el mismo que basado en las métricas expuestas en el capítulo anterior, permitirá llegar a una solución óptima de este problema.

#### **4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El problema que se presenta en este trabajo, para la correcta asignación de canales en WLAN con acceso oportunista, tiene como finalidad encontrar la asignación de canales para cada uno de los APs del escenario, a fin de mantener muy bajo el uso de canales de la banda primaria, y a su vez lograr minimizar los niveles de interferencia que estas causan. Como parámetros de entrada se considera cada AP del escenario con su respectiva ubicación, potencia de transmisión, y sensibilidad

Se busca mantener siempre al mínimo el uso de los canales de la banda primaria, puesto que no siempre se encuentran disponibles.

Así mismo, la disponibilidad de estos canales de banda primaria adicionales son diferentes para cada AP, pues dependen de la ubicación de cada AP.

La Figura 4.1 muestra un esquema del problema planteado.

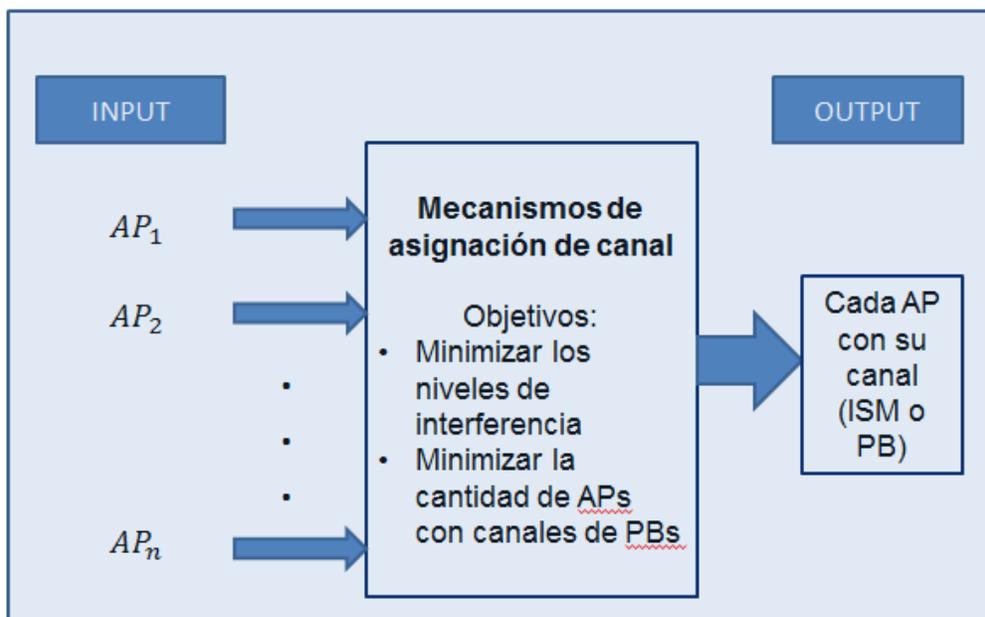


Figura 4.1 Esquema del sistema

## 4.2 FORMULACION MATEMÁTICA

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  $i$  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:

$$Tch(AP_k) = S(AP_k) + P(AP_k) \quad (4.1)$$

Dos APs son vecinos cuando existe un edge entre ellos, esto es que el cálculo de la condición de interferencia co-canal sea mayor a cero. De este modo, se define  $V(AP_k) = \{AP_l | \forall AP_l \in AP, I(AP_k^i, AP_l^i) > 0\}$  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].

### 4.3 SISTEMA DISTRIBUIDO COORDINADO

Para la resolución del problema planteado se propone un mecanismo de asignación, compuesto de dos etapas: la coordinación que se realiza en base a la construcción de un MST, y la asignación de canal en base al algoritmo heurístico Simulated Annealing.

#### 4.3.1 ETAPA DE COORDINACION

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  $N_c$ .

### 4.3.2 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 muestra como:

$$MI_{AP_k}^i = \max_{\forall AP_l \in V(AP_k)} I(AP_k^i, AP_l^{Tch(AP_l)}) \quad (4.2)$$

Si  $MI_{AP_k}^i$  está por debajo del umbral de  $I_{MAX}$ , entonces el canal  $i$  es considerado un posible canal 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 [47], se utiliza una función sigmoide para el análisis, y se describe a continuación:

$$U(MI_{AP_k}^i) = \begin{cases} 1 - (1 - z)e^{s(MI_{AP_k}^i - I_{MAX})}; & MI_{AP_k}^i \leq I_{MAX} \\ ze^{-s(MI_{AP_k}^i - I_{MAX})}; & \text{otros} \end{cases} \quad (4.3)$$

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, como se muestra en la ecuación (4.4):

$$T = \sum U_{AP_k}^i; \forall AP_k \in AP, i \in Tch \quad (4.4)$$

#### 4.4 PSEUDOCÓDIGO

El desarrollo del algoritmo está simplificado en la Figura 4.2, donde se muestra un proceso iterativo en cada MST, basado en la técnica probabilística SA. El funcionamiento está 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 a 1 (línea: 1).

Como el algoritmo se ejecuta periódicamente, la condición de parada del algoritmo se establece (línea: 2). Mediante una función de probabilidad, se obtiene un posible nuevo canal  $j_x$  evaluando un valor entre (0~1) (línea: 4).

La resolución de conservar el canal  $i_x$  o adquirir 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  $i_x$  de todos los vecinos del AP presente. Por lo tanto, si aumenta la utilidad (i.e.  $TU_{Tx} < 0$ ), se aprueba al nuevo canal  $j_x$  (línea: 6-7). En caso de que la nueva posible asignación reduzca 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 escenarios, el acceso o composición de accesos presente no cambia. En cada iteración, el valor de temperatura  $T$  se reemplaza mediante el factor de enfriamiento  $CR$ , con lo que paulatinamente irá decreciendo, y a su vez se actualiza el número de iteraciones, tal que la probabilidad de adoptar una nueva asignación de accesos que no contribuyan con la mejoría de la utilidad tiene la misma preferencia (línea: 19).

```

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  $ix$ ;
4. Obtiene un nuevo canal  $jx$ ;
5. Calcular  $TU_{Tx} = U_{Tx}(ix) - U_{Tx}(jx)$ 
6.   If  $TU_{Tx} < 0$  then
7.      $ix = jx$ ;
8.   elseif  $TU_{Tx} > 0$  then
9.     if  $random[0,1] < e^{(-TU_{Tx}/T)}$  then
10.       $ix = jx$ ;
11.    end(9)
12.   elseif  $TU_{Tx} = 0$  then
13.     if  $random[0,1] < e^{(-ex/T)}$  then
14.        $ix = jx$ ;
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 4.2 Pseudocódigo

## **CAPÍTULO 5**

### **5. EVALUACIÓN DEL ALGORITMO**

En este capítulo se definen los parámetros de simulación, y se analizan los resultados obtenidos del algoritmo coordinado y distribuido.

#### **5.1 CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO**

Por la cantidad de dispositivos simulados, y por las características del equipo que evaluará el algoritmo, la infraestructura del escenario está

compuesta por 16 edificios del escenario denso tipo Manhattan, los cuales están distribuidos en un área de  $450 \times 450 \text{m}^2$ .

Cada edificio cuenta con 8 pisos, sus respectivos parámetros de infraestructura se encuentran descritos en la sección 1 del capítulo 3, en la Tabla 5.1 se muestran los parámetros asignados a cada edificio para la ejecución de este análisis.

Tabla 5.1 Parámetros de configuración de infraestructura

Parámetro	Valor
Ancho de la calles, $c_1$	18 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 uso de PB	550 m

Es importante resaltar que cada PU se encuentra ubicado en los edificios esquineros del escenario, y que además se asegura que no exista ningún tipo de interferencia entre ellas, ni solapamiento de canales.

Así mismo los parámetros de configuración de los dispositivos descritos en la sección 2 del capítulo 3, se encuentran especificados en la Tabla 5.2

Tabla 5.2 Parámetros de configuración de dispositivos

	PU	SU
Potencia de transmisión(P)	—	17 dBm
Sensibilidad(S)	-80dBm	-80dBm
Margen de Protección(M)	10dB	10dB
Tipo de Antena	Omnidireccional	Omnidireccional
Frecuencia de Operación	515 – 683 MHz	2.4GHz 515 – 683 MHz

Adicionalmente en la Tabla 5.3, se muestran los parámetros de los modelos matemáticos presentados en la sección 1 del capítulo 3 y que representan las características de propagación electromagnéticas del escenario.

Por simplicidad de análisis, se considera que tanto las máscaras de transmisión en WLAN como en banda primaria son máscaras de forma

rectangular. Para este estudio la banda primaria está formada por un grupo de 28 canales UHF.

Así mismo es importante mencionar que cuando los canales de la banda primaria son usados por las WLAN con máscara de 22MHz, estos canales contiguos de la banda primaria se encuentran parcialmente solapados.

Tabla 5.3 Parámetros de Modelo de Propagación

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

La cantidad máxima de canales que las WLANs pueden usar de banda primaria es 23, así como se muestra en la Figura 5.1., así mismo se observa que estos canales se solapan entre sí, sin embargo solo 5 de estos canales no presentan ningún solape; tomando en cuenta ambas bandas de transmisión, entonces un AP puede tener en total 34 canales con solape, y 8 canales sin solape.

Se debe aclarar que para que un AP pueda usar un canal de banda primaria, se necesitan además 4 canales adyacentes de 6MHz adicionales al canal en uso, que se encuentren disponibles, por esta razón no se usan para la asignación de canales, ni los dos primeros ni los dos últimos canales de la banda primaria.

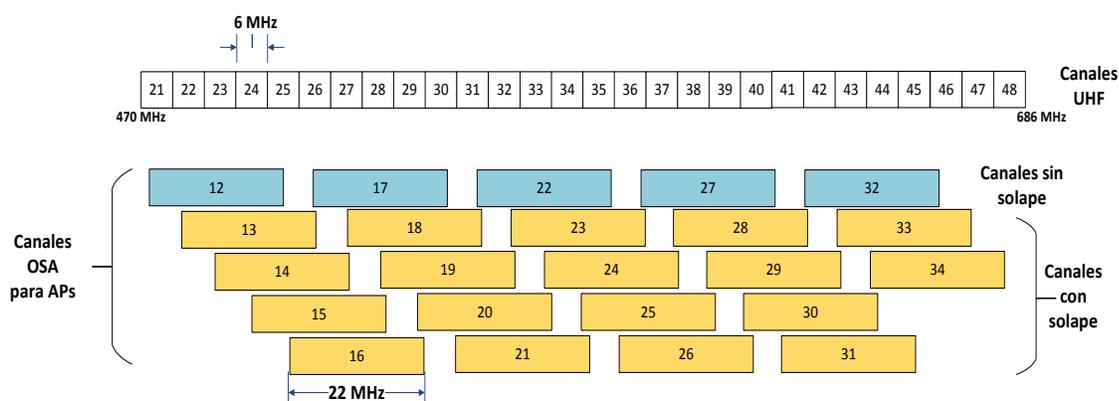


Figura 5.1 Canales de WLANs que pueden usar PB

## 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.

### 5.2.1 DETERMINACION DE FACTOR DE ENFRIAMIENTO

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 5.2 muestra la máxima interferencia del escenario, y a su vez la Figura 5.3 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 5.2, se encuentra que un valor elevado de CR presenta una interferencia baja en comparación con los demás valores, a su vez la Figura 5.3 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 5.4 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 5.3 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 5.5 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 5.2 y Figura 5.3, 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.

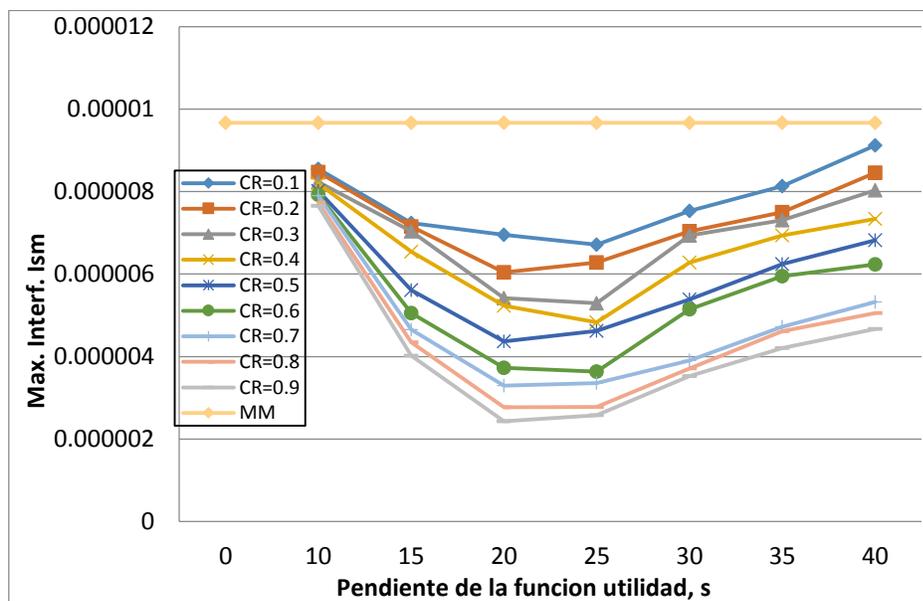


Figura 5.2 Máxima interferencia ISM vs factor  $s$

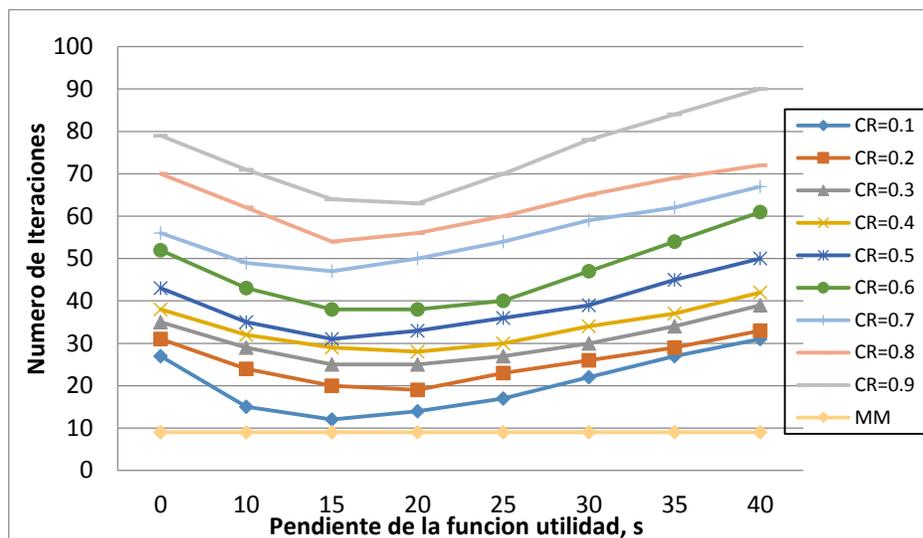


Figura 5.3 Numero de iteraciones vs factor s

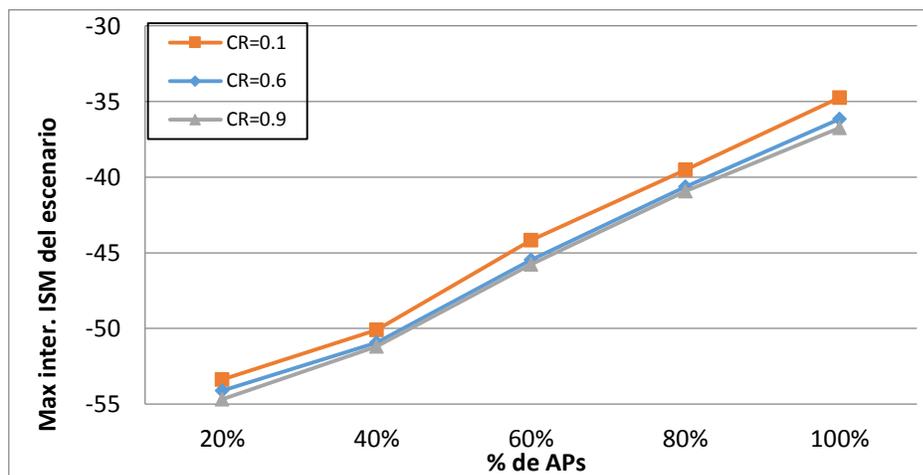


Figura 5.4 Máxima interferencia ISM vs % de APs

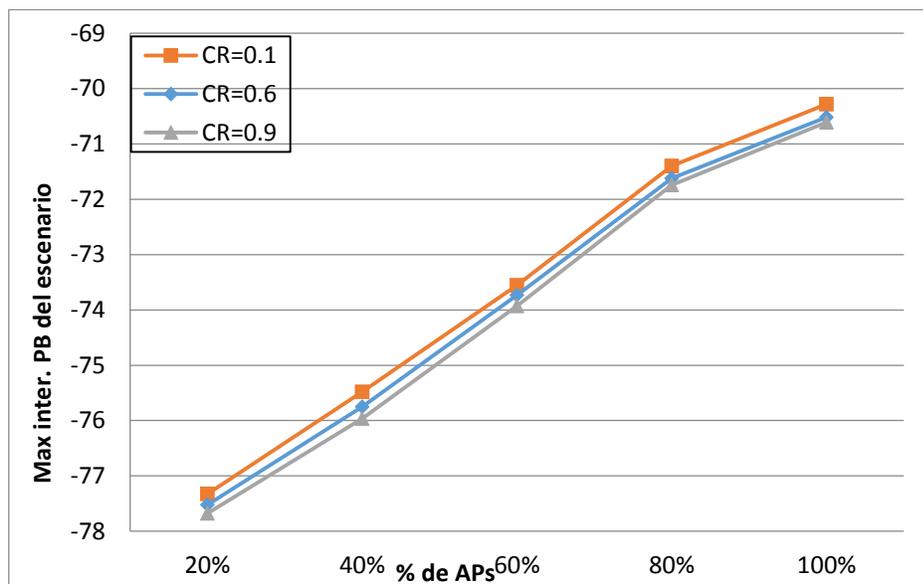


Figura 5.5 Máxima interferencia PB vs % de APs

### 5.3 DESEMPEÑO DEL ALGORITMO

En esta sección se analiza el rendimiento del algoritmo para diferentes porcentajes de llenado de APs en el escenario; en la Figura 5.6 y la Figura 5.7, 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.

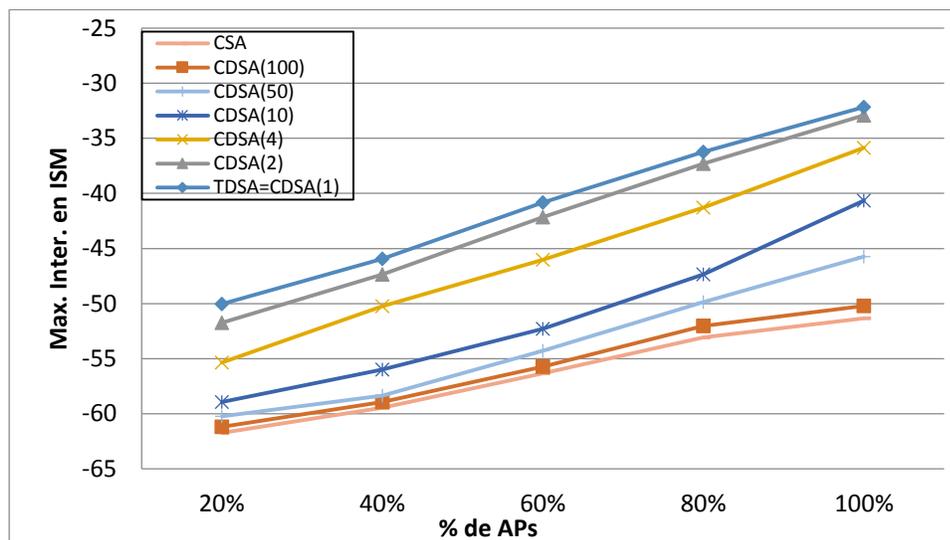


Figura 5.6 Máxima interferencia del escenario en ISM a distintas agrupaciones vs porcentaje de APs

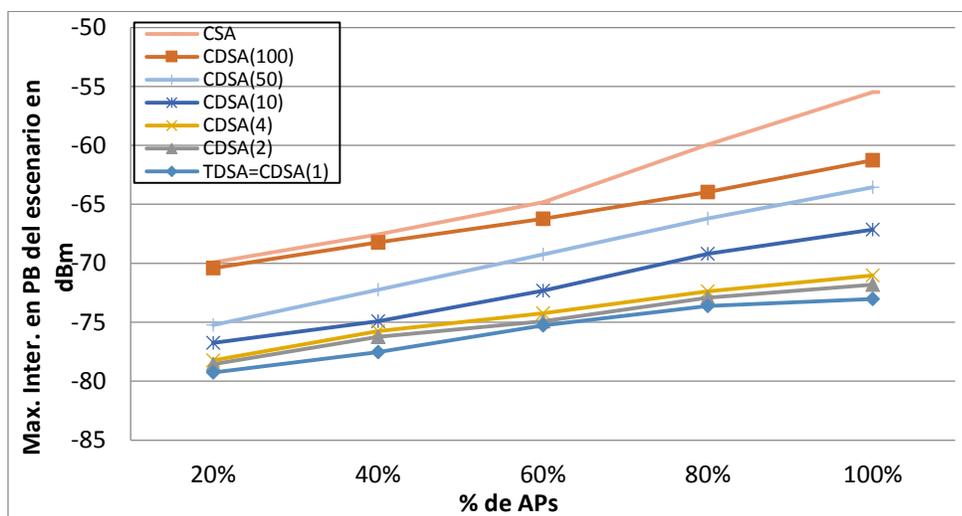


Figura 5.7 Máxima interferencia del escenario en PB a distintas agrupaciones vs porcentaje de APs

### 5.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se puede ver, en la Figura 5.8 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 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 5.9, 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

Figura 5.8, se obtuvo una mejora de 21dBm con CDSA(100) respecto de MM.

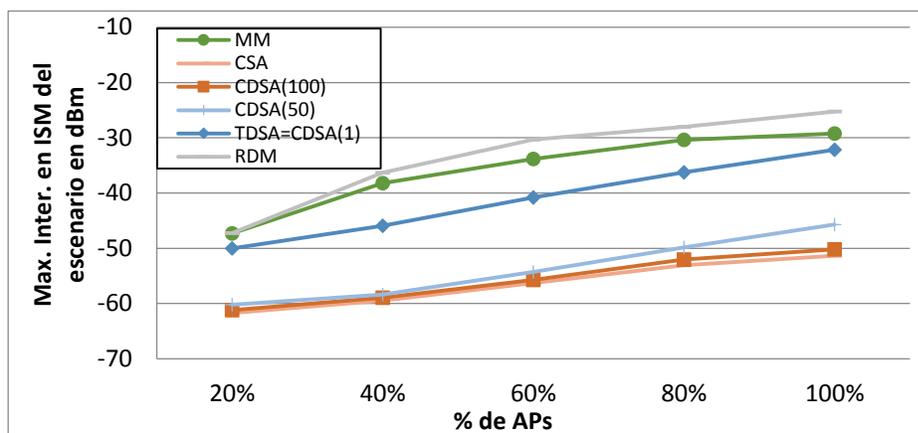


Figura 5.8 Máxima interferencia del escenario en ISM vs porcentaje de APs

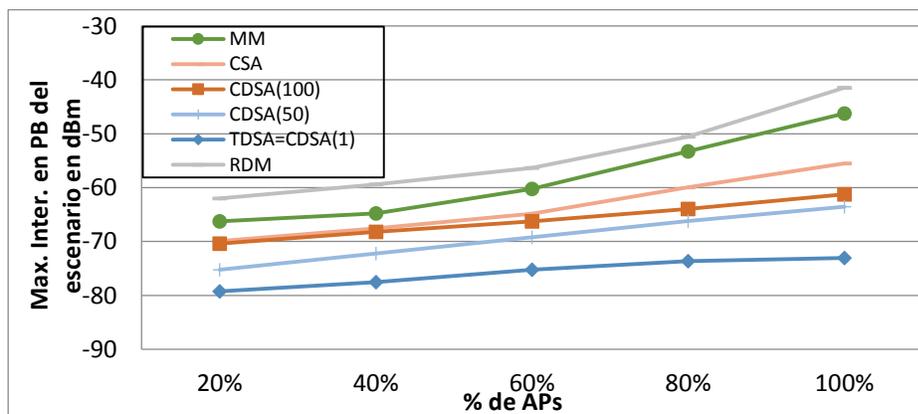


Figura 5.9 Máxima interferencia del escenario en PB vs porcentaje de APs

La Figura 5.10 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 5.11, 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.

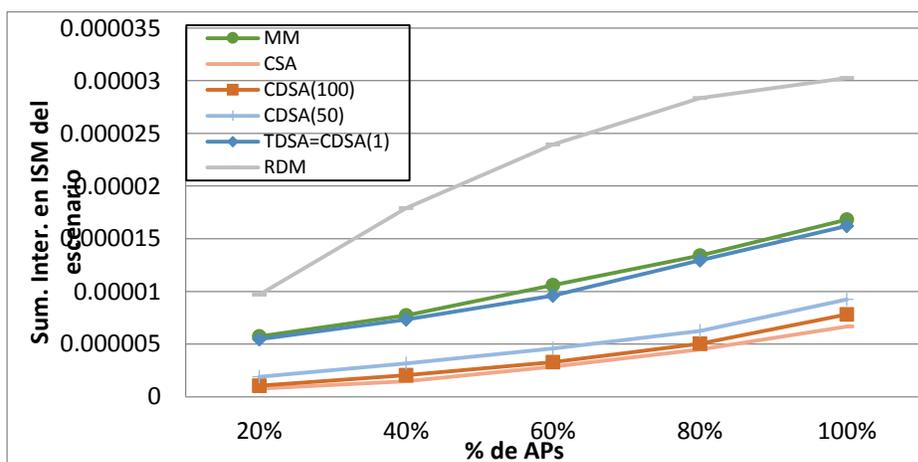


Figura 5.10 Sumatoria de interferencias del escenario en ISM vs porcentaje de APS

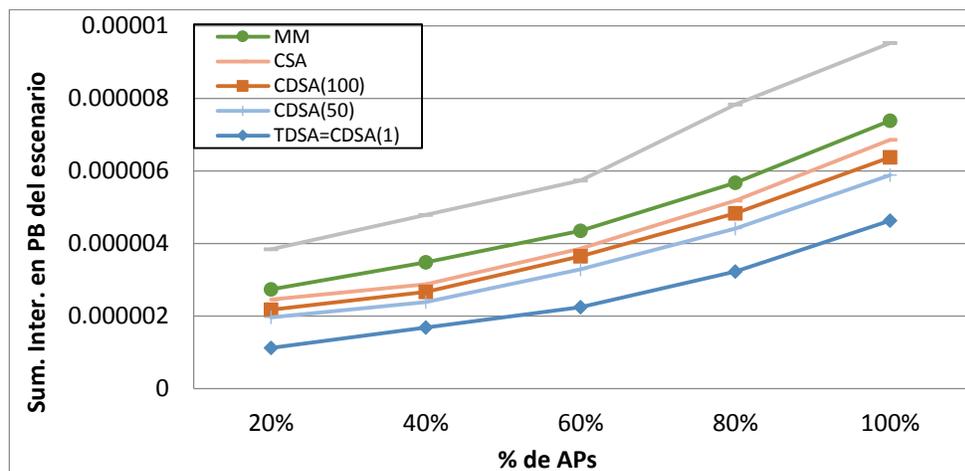


Figura 5.11 Sumatoria de interferencias del escenario en PB vs porcentaje de APS

Por último en la Figura 5.12 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.

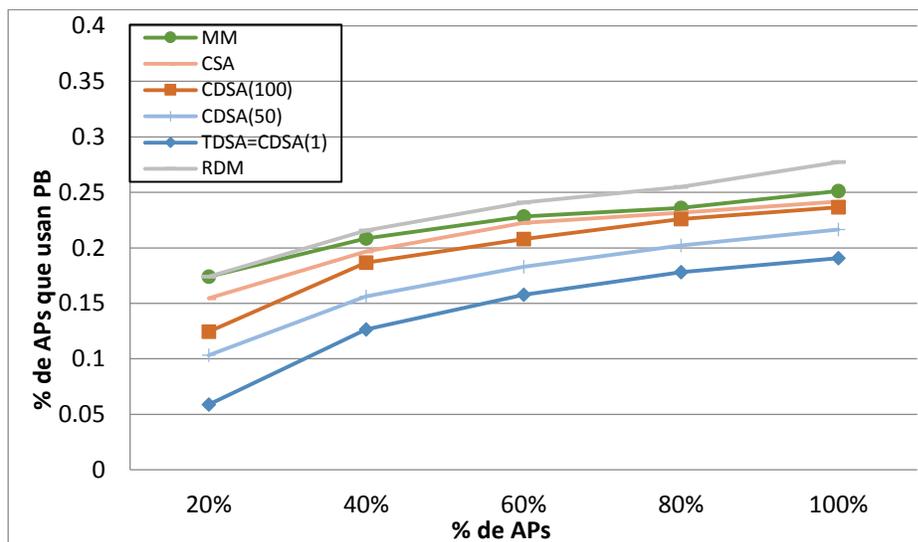


Figura 5.12 Porcentaje de APs en el escenario que utilizan PB vs porcentaje de APs

## CONCLUSIONES

1. Se logró que el algoritmo coordinado y distribuido mejore los niveles de interferencia en 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.
2. El algoritmo coordinado y distribuido encuentra mejores asignaciones de canales cuando la disponibilidad de los canales primarios aumenta.
3. El algoritmo coordinado y distribuido mejora al MinMax mediante el uso de MTSs tanto en ISM como en PB, realizando una mejor distribución de los canales en ambas bandas.
4. 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.

## RECOMENDACIONES

1. El escenario analizado presenta 16 edificios separados por calles, con una cantidad de 3 pisos cada uno; un mejor análisis podría realizarse con una mayor cantidad de pisos, tomando en cuenta que la cercanía entre APs es mayor entre piso y piso, lo que aumentaría la interferencia entre APs.
2. Pueden considerarse diferentes métricas para la evaluación de este algoritmo, para este trabajo se utilizó únicamente la interferencia, sin embargo este mismo algoritmo se puede evaluar para analizar el rendimiento de la tasa de transmisión de datos entre APs, los niveles de throughput, entre otras.
3. Se debe considerar para estudios futuros un escenario donde continuamente se esté analizando la disponibilidad especial de su entorno, esto es que se tome en consideración los cambios inesperados de los usuarios primarios, para con esto mantener informados a cada AP de la disponibilidad de nuevos canales, y así ir actualizando la base de datos de los mismos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [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, nº 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] Q. Zhao y B. M. Sadler, «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 Sectrum Heterogeneity,» *IEICE TRANS. COMMUN*, Vols. %1 de %2Vol. E95-B, nº 4, pp. 1125-1134, 2012.
- [7] L. Chamorro y A. Barbosa, «Espectro abierto para el desarrollo, Estudio de caso: Colombia,» 2011. [En línea]. Available: [http://www.apc.org/es/system/files/Espectro\\_Colombia.pdf](http://www.apc.org/es/system/files/Espectro_Colombia.pdf). [Último acceso: 15 Octubre 2014].
- [8] M. Perona y M. Alvarado, «Estudio abierto para el desarrollo, Estudio de caso: Peru,» 2011.
- [9] N. Ai-bing, M. Liang y X. Xiao-hua, «Solving Degree-constrained,» de *International Conference on Management Science and Engineering*,

2007, Minimum Spanning Tree with a New Algorithm.

- [10] K. K. Leung y B.-J. J. Kim, «Frequency Assignment for IEEE 802.11 Wireless Networks,» Vehicular Technology conference, vol. 3, pp. 1422-1426, 2003.
- [11] X. Yin, C. Yin, D. Liu y R. Zhang, «Spatial Opportunity in Cognitive Radio Networks with Primary Transmitter Assisted Opportunistic Spectrum Access,» de Wireless Symposium (IWS), Beijing, 2013.
- [12] M. López-Benitez, F. Casadevall, A. Umbert y J. Pérez-Romero, «Spectral Occupation Measurements and Blind Standard Recognition Sensor for Cognitive Radio Networks,» de CROWNCOM, Hannover, 2009.
- [13] FCC, «[www.fcc.gov](http://www.fcc.gov),» [En línea]. Available: <http://www.fcc.gov/encyclopedia/white-space-database-administration>. [Último acceso: 10 Febrero 2015].
- [14] «[www.ieee.org](http://www.ieee.org),» 24 Febrero 2014. [En línea]. Available: [http://standards.ieee.org/news/2014/ieee802.11af\\_amendment.html](http://standards.ieee.org/news/2014/ieee802.11af_amendment.html). [Último acceso: 10 Febrero 2015].
- [15] C. Peng, H. Zheng y B. Y. Zhao, «Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access,» Mobile Network Applications, pp. 555-577, 2006.
- [16] J. Mitola, «Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software defined Radio,» de Ph. D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [17] J. Mitola, «Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications,» de Mobile Multimedia Communications, San Diego, CA, 1999.
- [18] I. Akyildiz, W. Lee, M. Wuran y S. Mohanty, «NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A survey,»

Computer Networks, 2006.

- [19] I. F. Akyldiz, L. Won-Yeol, V. Mehmet C. y M. Shantidev, «A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks,» IEEE COMMUNICATIONS, pp. 40-48, April 2008.
- [20] A. Garhwal y P. P. Bhattacharya, «A Survey on Dynamic Spectrum Access Techniques For Cognitive Radio,» International Journal of neXt-Generation Networks, pp. 18-32, Diciembre 2011.
- [21] O. Ileri, D. Samardzija y N. Mandayam, «Demand Responsive Competitive Spectrum Allocation via Spectrum Server,» de Proc. IEEE DySPAN, 2005.
- [22] K. Nisimori, E. Bottega, H. Yomo, P. Popovski, Y. Takatori, R. Prasad y S. Kubota, «Spatial Availability for Cognitive Radio Systems Under Directional interference,» de Proc. 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2006.
- [23] B. Wang y K. Liu, «Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey,» Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of, pp. 5-23, Febrero 2011.
- [24] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami y Y. Chen, «Decentralized Cognitive MAC for Opportunistic Spectrum Access in ad hoc Networks,» A POMDP framework, Selected Areas in communications IEEE Journal, pp. 589-600, Abril 2007.
- [25] «ETSI TR 102 907 V.1.1.1. Technical Report, Reconfigurability Radio Systems (RSS): Use Cases for Operation in White Space Frecuencia Bands,» 2011. [En línea]. Available: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102900\\_102999/102907/01.01.01\\_60/tr\\_102907v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102900_102999/102907/01.01.01_60/tr_102907v010101p.pdf). [Último acceso: Diciembre 2014].
- [26] T. B. Alemu, «Spectrum Availability Assessment Tool for TV White Space Cognitive,» Sustentación de Masterado, aalto university, Espoo, Finland,

2012.

- [27] M. Nekovee, «A Survey of Cognitive Radio Access to TV White Spaces,» Hindawi Publishing Corporation - International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010.
- [28] FCC-10-174, «In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: SECOND MEMORANDUM OPINION AND ORDER,» 23 Septiembre 2010. [En línea]. Available: [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-10-174A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-10-174A1.pdf). [Último acceso: 10 Febrero 2015].
- [29] ECC Report 159: Technical and Operational Requeriments for the Possible Operation of cognitive Radio Systems in the White Spaces of the Frecuency Band 470-790 MHz, 2010.
- [30] «ECC draft Report 186: Technical and operational requirements for the Operation of white Space devices under geo-location approach,» 2014 Diciembre. [En línea]. Available: <http://www.cept.org/files/1051/Tools%20and%20Services/Public%20Consultations/2012/Draft%20ECC%20Report%20186.docx>.
- [31] «IEEE Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN and MAN - Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications; Amendment: TV White Spaces Operat,» IEEE P802.11af/D3.0, pp. 1-328, 2013.
- [32] «IEEE Recommended Practice for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems Wireless Regional Area Networks (WRAN)-Specific Requirements-Part 22.2:Installation and Deployment of IEEE 802.22 Systems,» IEEE Std 802.22.2-2012, 2012.
- [33] A. Gomes y H. Alver, «COGEU FP7 ICT-2009.1.1-Contract number INFISO-ICT-248560 Cognitive radio systems for efficient sharing of TV

- White Spaces in European context,» D2.1 European TV White Spaces Analasys COGEU use-cases, 2009.
- [34] W. Stallings, «IEEE 802.11: Wireless LAN from a to n,» IT Professional, pp. 32-37, 2014.
- [35] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11TM-2012, 2012.
- [36] F. Novillo, Proposal and Evaluation of Channel Assignment Algorithms for Wireless Local Area Networks with Opportunistic Spectrum Access Capabilities, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions - Universitat Poliecnica de Catalunya, 2013.
- [37] E. Perahia y R. Stacey, Next Generation Wireless LANs Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n, Cambridge University Press, 2008.
- [38] A. Mishra, V. Shrivastava, D. Agrawal, S. Banerjee y S. Ganguly, «Distributed Channel Management in Uncoordinated wireless Enviroments,» de Proc. International Conference on Mobile Computing and Networking, 2006.
- [39] Y. Bejarano, S. Han y L. Li, «Fairness and Load Balancing in wireless LANs Using Association Control,» de Mobicon, 2004.
- [40] A. Akella, G. Judd, S. Seshan y P. Steenkiste, «Self-Management in Chaotic Wireless Deployments,» de ACM Mobicom, 2005.
- [41] B. Alawieh, Y. Zhang, C. Assi y H. Mouftah, «Imrpoving Spatial Reuse in Multihop Wireless Networks - A Survey,» IEEE Commun. Surveys Tutorials, vol. 11, nº 3, 2009.
- [42] R. Rutenbar, «Simulated Annealing Algorithm: An Overview,» Circuits and Devices Magazine, IEEE, vol. 5, nº 1, pp. 19-26, 1989.
- [43] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt y M. P. Vecchi, «Optimization by Simulated

- Annealing,» *Science, New Series*, vol. 220, nº 4598, pp. 671-680, 1983.
- [44] C. Ding, H. Xiaofeng, Z. Hongyuan y H. Ming, «A min-max cut algorithm for graph partitioning and data clustering,» de *International Conference of Data Mining*, San José, CA, 2001.
- [45] Instituto Chileno de Investigación Operativa, «[www.ichio.cl](http://www.ichio.cl),» [En línea]. Available: <http://www.ichio.cl/index.php/topicos/metaheuristica/simulated-annealing>. [Último acceso: 10 enero 2015].
- [46] F. Novillo, H. Galena y R. Ferrus, «Spectrum Availability in Indoor Locations for Opportunistic Spectrum Access In Dense Urban Scenarios,» *IEEE 69th*, pp. 1-5, 2009.
- [47] F. Novillo y R. Ferrus, «Distributed Channel Assignment Algorithm based on Simulated Annealing for Uncoordinated OSA-Enabled WLANs,» de *6th International ICST on Cognitive Radio Oriented Wireless Network and Communications* , 2011.
- [48] A. Vasa, R. Ramjee, R. Woo y T. Echos, «Enhanced Capacity 802.11,» de *Proc. IEEE Infocom*, 2005.
- [49] Y. Lee, K. Kim and Y. Choi, "Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs," in *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, Seoul, Korea, November 2002.