



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE CANALES PARA
REDES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS CON
ACCESO OPORTUNISTA BASADO EN ALGORITMOS
GENÉTICOS”**

TESINA DE SEMINARIO

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

Andrés Gabriel Sacoto Castro

Jonathan Javier Solís Hidalgo

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2014

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo nos apoyaron en la realización de este trabajo y quienes siempre estuvieron pendiente de nuestro avance, y particularmente al Ph.D. Francisco Novillo, Director de la Tesina, por su dedicada guía.

DEDICATORIA

A mis padres, a mi hermano, a mi familia, a mis amigos, al Ecuador y al mundo.

Andrés Sacoto Castro.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, fortaleza y llenarme de bendiciones. A mi padre, que desde el cielo me cuida y protege. A mi madre, pilar de mi vida, ejemplo y apoyo incondicional en todo momento. A mi abuelita y a mis hermanas, que con su cariño me han inspirado a seguir adelante. A mis tíos y familiares por su constante e inigualable apoyo. A mis amigos por brindarme su valiosa amistad durante esta gran etapa de mi vida. A todos gracias. ¡Muchas gracias!

Jonathan Solís Hidalgo.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ph.D. Francisco Novillo P.

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

M.Sc. Carlos Valdivieso A.

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesina, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Andrés Gabriel Sacoto Castro

Jonathan Javier Solís Hidalgo

RESUMEN

La creciente demanda de conectividad inalámbrica (e.g. estándar IEEE802.11) en zonas densamente pobladas, conlleva a una gran cantidad de dispositivos de acceso inalámbrico operando sin coordinación sobre un mismo espacio geográfico, lo que podría llevar a altos niveles de interferencia entre los dispositivos, ya que operan en bandas de uso compartido (i.e. ISM). Fruto de esto se podrían generar problemas de funcionamiento tales como la atenuación del nivel de señal de transmisión y consecuentemente un bajo rendimiento de la red. Una posible solución a estos problemas podría ser el uso oportunista de canales de bandas licenciadas que tienen algún tipo de disponibilidad temporal o espacial.

En este contexto se propone un sistema que disminuya la congestión del espectro en la banda ISM, mediante el desarrollo de un mecanismo de asignación de canales con acceso oportunista al espectro subutilizado, empleando conocidas técnicas heurísticas para la asignación de recursos como son los algoritmos genéticos, comúnmente utilizados en problemas de optimización complejos. Para esto será considerada la heterogeneidad del espectro y la priorización del uso de la banda ISM, con el fin de disminuir interferencias entre WLANs en un escenario urbano con diferentes densidades de dispositivos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	V
DECLARACIÓN EXPRESA	VI
RESUMEN	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
INTRODUCCIÓN	XVIII

CAPÍTULO 1

MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

1.1 Descripción del Problema	1
1.2 Objetivos Generales	4
1.3 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Organización del documento	5

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1	Redes Inalámbricas IEEE 802.11	8
2.1.1	Capas utilizadas	9
2.1.2	Características	10
2.1.3	Componentes y Arquitectura.....	13
2.1.4	Gestión del espectro de frecuencia en WLAN	16
2.2.	Acceso Oportunista al Espectro	20
2.2.1	Introducción	20
2.2.2	Características	21
2.2.3	Componentes y Arquitectura.....	28
2.2.4	Sistemas de Detección de canales	32
2.2.5	Sistemas o Proyectos	35
2.4.	Mecanismos de Asignación de Canal	37
2.4.1	Características	37
2.4.2	Técnicas o Esquemas.....	40
2.5.	Algoritmos Genéticos	45
2.5.1	Introducción	46
2.5.2	Codificación de Problemas	48
2.5.3	Algoritmo Principal	49
2.5.4	Operadores Genéticos	51
2.5.5	Función de Evaluación.....	60

CAPÍTULO 3

MODELAMIENTO DEL ESCENARIO

3.1	Introducción	64
3.2	Descripción de Componentes	65
3.3	Condiciones de Uso del Espectro	67
3.4	Modelos de Propagación	72
3.4.1	Modelo de Propagación en Exteriores	73
3.4.2	Modelo de Propagación en Interiores	73
3.5	Solape Frecuencial	75
3.6	Relación de Interferencia	79

CAPÍTULO 4

MECANISMO DE ASIGNACIÓN DE CANAL

4.1	Planteamiento del Problema	82
4.2	Formulación Matemática	84
4.3	Descripción del Algoritmo Propuesto	86

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DEL ALGORITMO

5.1	Configuración del Escenario	96
5.2	Parámetros del Algoritmo	100
5.3	Hardware y Software Utilizados	105

5.4 Resultados de Simulación.....	106
5.4.1 Análisis por generaciones	106
5.4.2 Resultados por escenarios.....	117
CONCLUSIONES	125
RECOMENDACIONES.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	129

ABREVIATURAS

AP	Access Point
GA	Genetic Algorithm
BCC	Binary Convolutional Coding
BSS	Basic Service Set
CR	Cognitive Radio
DS	Distribution System
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission (of US)
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical band
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSA	Opportunistic Spectrum Access
PU	Primary User
QoS	Quality of Service

SH	Spectrum Holes
STA	Associated WLAN Client Stations
SU	Secondary Users
TV	Television
TVWS	TV White Space
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
WLAN	Wireless Local Area Network
WS	White Space

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Estructura del documento	7
Figura 2.1	IEEE 802.11 Arquitectura de Protocolo [23]	10
Figura 2.2	IEEE 802.11 Componentes y Arquitectura [22]	15
Figura 2.3	Superposición de canales WLAN a 2.4GHz [7]	20
Figura 2.4	Funciones de gestión del espectro de CR [34]	23
Figura 2.5	Arquitectura de la red Radio Cognitiva [22] [32]	29
Figura 2.6	Despliegues WLAN [22].....	39
Figura 2.7	Esquema de la implementación de un Algoritmo Genético	47
Figura 2.8	Individuo genético binario [14]	48
Figura 2.9	Funcionamiento de un Algoritmo Genético [14].....	50
Figura 2.10	Cruce de un punto [14]	56
Figura 2.11	Cruce de dos puntos [14].....	56
Figura 2.12	Cruce uniforme [14]	57
Figura 3.1	Escenario Manhattan	66
Figura 3.2	Caracterización de la interferencia para el reúso del espectro	67
Figura 3.3	Localización de sistemas y uso de modelos de propagación	75
Figura 3.4	Solape Frecuencial	77
Figura 4.1	Mecanismo de Asignación de Canal.....	83
Figura 4.2	Representación del Escenario en Grafo	84

Figura 4.3	Estructura de la Población	87
Figura 4.4	Entidad Central	88
Figura 4.5	Pseudocódigo del Algoritmo Genético	90
Figura 4.6	Ejemplo del operador de cruce	93
Figura 4.7	Pseudocódigo de la función Mutar Hijo.....	95
Figura 5.1	Máscara de 22 MHz en BP	100
Figura 5.2	Interferencia Total en Banda ISM versus Generaciones, para diferentes valores de Probabilidad de Mutación	101
Figura 5.3	Interferencia Total en Banda ISM versus Generaciones, para diferentes valores de Elitismo	102
Figura 5.4	Interferencia Total en Banda ISM versus Generaciones, para diferentes tamaños de la población	104
Figura 5.5	Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda ISM versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax, OSA...	109
Figura 5.6	Interferencia máxima por escenario en banda ISM versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax.....	111
Figura 5.7	Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda UHF versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax	112
Figura 5.8	Interferencia máxima por escenario en banda UHF versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax.....	113
Figura 5.9	Número de enlaces promedio por AP versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax, OSA	114

Figura 5.10	Porcentaje de APs operando en banda ISM y UHF versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax.....	115
Figura 5.11	Porcentaje de APs operando en banda ISM y UHF por piso del edificio	116
Figura 5.12	Distribución de APs operando en banda ISM y UHF por piso del edificio	117
Figura 5.13	Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda ISM versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax.....	119
Figura 5.14	Interferencia máxima por escenario en banda ISM versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax	120
Figura 5.15	Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda UHF versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax.....	121
Figura 5.16	Interferencia máxima por escenario en banda UHF versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax	121
Figura 5.17	Número de enlaces promedio por AP versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax.....	122
Figura 5.18	Porcentaje de APs operando en banda ISM y UHF versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax	124

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Principales estándares de IEEE 802.11	12
Tabla 2.2 Bandas ISM	17
Tabla 2.3 Canales y frecuencias disponibles por país	18
Tabla 5.1 Parámetros configurados	97
Tabla 5.2 Parámetros de Modelos de Propagación	98
Tabla 5.3 Parámetros del Algoritmo.....	105
Tabla 5.4 Hardware utilizado	106
Tabla 5.5 Generaciones y tiempos de ejecución	108

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de redes de área local inalámbricas (WLAN) en zonas urbanas densas, especialmente para acceso a internet [1], podría producir un crecimiento descontrolado y excesivo de niveles de interferencia entre puntos de acceso (APs), debido principalmente a que la banda ISM, en la cual operan comúnmente estos sistemas, es de uso compartido y tiene un limitado número de canales (i.e. 11 con solape y 3 sin solape), lo que podría provocar una disminución del rendimiento y un aumento de la inestabilidad de las redes [2].

Actualmente existen algunos mecanismos que permiten disminuir la interferencia entre puntos de acceso, los cuales han sido desarrollados con el fin de aliviar la congestión en las bandas de operación de estos sistemas y para hacer frente a este tipo de problemas de rendimiento. Entre estos mecanismos resaltan el control de asociación o equilibrio de carga [3], en el que una unidad principal asocia las estaciones con los APs con el propósito

de equilibrar el tráfico en cada red, otro método es el control de potencia [4], [5], en la cual la potencia de transmisión de cada AP se sintoniza de forma dinámica. Otra técnica que es muy considerada y aplicada hoy en día es la asignación de canales, en la cual un canal de frecuencia es asignado a cada AP con el objetivo de garantizar la menor interferencia entre ellos evitando que dispositivos cercanos tengan canales solapados [6].

Esto ha motivado que en la comunidad científica, durante los últimos años, se hayan generado algunos trabajos al respecto; así en [7], los autores proponen dos algoritmos heurísticos de asignación de canal con el objetivo de asignar una frecuencia óptima para cada AP de tal manera que se maximice el rendimiento mientras la interferencia entre diferentes puntos de acceso se reduce al mínimo. Otra propuesta es [8], en el cual se considera un algoritmo de asignación de canal distribuido para WLANs sin coordinación, donde los APs pueden auto-configurar sus canales de operación para minimizar la interferencia. Sin embargo, estos mecanismos de asignación de canal no son sostenibles a largo plazo debido al limitado número de canales.

Este hecho ha impulsado la investigación científica en técnicas de radio cognitiva, la cual busca que ciertos sistemas que operan en bandas sin

licencia puedan acceder de manera oportunista a segmentos de espectro no utilizados (i.e. White space) en bandas con licencia sin causar interferencias a los usuarios primarios. Este concepto es conocido como Opportunistic Spectrum Access (OSA) [9].

De esta manera, el estudio de la disponibilidad de canales en bandas licenciadas permite viabilizar la operación de sistemas basados en OSA. Respecto a este tema, existen estudios que identifican la disponibilidad espacial y/o temporal de White space (WS). Así por ejemplo en [10], se cuantifica el porcentaje de lugares en los que es posible explotar OSA para sistemas de comunicación de radio de corto alcance dentro de espacios interiores en zonas urbanas densas; o como en [11], donde los autores desarrollan una herramienta de evaluación de disponibilidad de espectro integrada para TV White Space (TVWS) con el fin de identificar la cantidad de espectro que es utilizable para acceso secundario oportunista; por ello, organismos reguladores y normalizadores (por ejemplo, IEEE, ECC) se han visto en la necesidad de dictar normas y estándares que permitan el acceso oportunista a espacios en blanco del espectro (OSA WLAN) [12].

Basados en los resultados de tales estudios se han propuesto mecanismos de asignación de canales que permitan disminuir la interferencia entre

dispositivos permitiendo el uso de bandas licenciadas de manera oportunista. Es por esto que en [13], los autores proponen un algoritmo de asignación de canales para ambientes WLAN con posibilidad de OSA, en donde es necesario considerar dos restricciones o características particulares para este tipo de escenarios: (1) priorización de canal, es decir, criterios de priorización al momento de elegir entre un canal de la banda ISM o un canal de la banda primaria (PB); y (2) heterogeneidad del espectro, es decir, considerar que la disponibilidad de canales no es la misma para todos los APs, pues esta depende de la ubicación de los puntos de acceso y la actividad de los usuarios primarios (PU).

Utilizando estos principios, el presente trabajo propone un mecanismo de asignación de canal centralizado para escenarios con despliegues densos de WLANs con acceso oportunista al espectro, considerando tanto la priorización de canal y la heterogeneidad del espectro en cada AP. En particular las WLANs tienen capacidad de operar en banda ISM o en banda licenciada, de manera que el algoritmo propuesto está diseñado para minimizar la interferencia entre todos los APs del escenario permitiendo el acceso a bandas licenciadas sólo si estos canales disminuyen la interferencia de todo el conjunto de APs. El algoritmo propuesto se deriva de técnicas de Computación Evolutiva, específicamente es una adaptación de los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) [14], cuyo conjunto de técnicas

computacionales está ligada a conceptos de procesos biológicos reales que buscan la solución de un problema mediante la evolución de los individuos de una población genética inicial.

Este trabajo evalúa el GA en un escenario simulado con capacidad OSA y muestra resultados de esta propuesta para diferentes densidades de puntos de acceso WLAN y para diferentes condiciones de disponibilidad de espectro, además, el algoritmo es comparado con otro algoritmo de asignación de canal muy utilizado en WLANs.

El resto del documento se organiza de la siguiente forma: en el capítulo 3 se describe el escenario de estudio y se hace una caracterización del sistema en general. En el capítulo 4, se describe detalladamente el algoritmo propuesto, mientras su evaluación de desempeño se realiza en el capítulo 5. Finalmente se presenta las observaciones finales y se discuten posibles trabajos futuros.

CAPÍTULO 1

MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

En este capítulo la descripción del problema que causa el exceso de dispositivos operando en bandas sin licencia con respecto a los niveles de interferencia es presentada, también los objetivos generales y específicos son planteados, además la estructura como se desarrolla este documento es detallada.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, el despliegue de redes de área local inalámbricas (WLAN) ha aumentado tanto en espacios públicos como en privados, así como la demanda de conexiones inalámbricas para acceso a internet. Esto ha provocado que las redes WLAN se conviertan en la tecnología de acceso predominante entre dispositivos móviles.

Los dispositivos WLAN hacen uso compartido y sin preferencia de la banda sin licencia ISM (Industrial, Científica y Médica) en 2.4 GHz [15], por lo que los despliegues WLAN altamente densos conllevarían a niveles excesivos de interferencia en dicha banda y podrían deteriorar el rendimiento de la red. Estos escenarios densos pueden ser generados por despliegues WLAN empresariales a gran escala, así como producto del conjunto de instalaciones WLAN individuales en edificios residenciales.

En este contexto, los mecanismos de asignación de canal constituyen una poderosa herramienta para reducir el nivel de interferencia entre vecinos WLAN sin perjudicar el rendimiento de sus redes individuales. Hoy en día, el problema de asignación de canales WLAN en banda sin licencia ha atraído la atención de los investigadores a nivel mundial [7], [16].

Sin embargo, a pesar de la eficiencia de los algoritmos de asignación de canal para mejorar el rendimiento de las redes WLAN, la cantidad de espectro disponible en la banda no licenciada continua siendo un factor limitante en despliegues altamente densos (i.e. 11 canales con solape y 3 canales sin solape).

Este hecho ha impulsado la explotación de bandas adicionales para redes WLAN (i.e. bandas licenciadas a las que se accede de forma oportunista) a fin de ayudar a mejorar el rendimiento de estas redes. Ciertos dispositivos WLAN, como los puntos de acceso (APs) y las estaciones asociadas (STAs), funcionarían como usuarios secundarios (SUs) de estas bandas adicionales y transmitirían sin causar interferencia a los usuarios primarios (PUs), los cuales mantienen los derechos de uso de dicha banda. Este concepto de reutilización del espectro se lo conoce como Acceso Oportunista al Espectro (OSA) [17], [18].

OSA es un modelo de acceso dinámico al espectro, el cual busca mejorar su utilización, permitiendo que un mayor número de usuarios y servicios compartan la misma banda, según una estructura jerárquica de acceso basada en usuarios primarios y secundarios.

Adicionalmente, se conoce que el espectro electromagnético es un recurso limitado y que las agencias reguladoras gubernamentales asignan segmentos de este para proporcionar licencias de uso exclusivo a ciertos operadores de telecomunicaciones sobre un área delimitada. Esto provoca que el espectro licenciado no siempre esté

siendo utilizado al 100%. Por lo tanto, existe una potencial disponibilidad de estas partes de espectro no utilizado (e.g. espacios en blanco, WS) para ser explotadas de manera oportunista [19], [20]. Por otro lado, algunos estudios muestran que incluso cuando una banda con licencia es utilizada permanentemente por un usuario principal, también puede ser reutilizada de forma oportunista en locaciones interiores, donde se espera la existencia de muchos dispositivos WLAN operando.

1.2 OBJETIVOS GENERALES

Motivados por los beneficios que puedan generar las capacidades de acceso oportunista al espectro (OSA) en las redes WLAN, este trabajo persigue el diseño y la evaluación de un algoritmo, que basado en la disponibilidad y heterogeneidad del espectro, asigne canales de operación a redes WLAN eficientemente, a fin de mejorar su rendimiento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar un escenario considerando disponibilidad espacial y heterogeneidad del espectro, que permita el estudio del

algoritmo de asignación de canal para escenarios WLAN con disponibilidad OSA.

- Desarrollar un mecanismo de asignación de canal basado en algoritmos genéticos, que permitan a las redes WLAN operar en los canales disponibles, tanto en la banda ISM sin licencia como en bandas licenciadas con capacidad OSA, a fin de aliviar la congestión en la banda ISM.
- Evaluar el rendimiento del algoritmo propuesto y compararlo con otro mecanismo de asignación de canal comúnmente usado en problemas de asignación de recursos.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

La estructura de este trabajo se muestra en la Figura 1.1, donde se describe cómo cada capítulo y sus contenidos interactúan unos con otros.

El capítulo 2 establece los fundamentos teóricos utilizados en las tecnologías de redes de área local inalámbrica (WLAN) y en la de

acceso oportunista al espectro (OSA), además de los conceptos básicos que envuelven a los mecanismos de asignación canal y sobre todo el principio y funcionamiento de los algoritmos genéticos.

El capítulo 3 presenta tanto las características físicas que restringen la ubicación de los Access Points como las características del medio de transmisión inalámbrico, además de las condiciones de disponibilidad de banda primaria.

En el capítulo 4, se formula el problema de la interferencia entre dispositivos WLAN como un problema de falta de organización en la asignación de canales. Se presenta la formulación matemática que sustenta el análisis del escenario, así como la descripción del algoritmo propuesto, el cual, utilizando las métricas y las restricciones presentadas en el capítulo 3, pueda hallar una solución óptima al problema planteado.

En el capítulo 5, se establecen los parámetros específicos de simulación y se procede a analizar el rendimiento y los resultados del algoritmo que se describe en el capítulo 4.

Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio realizado y se sugieren recomendaciones para trabajos futuros.

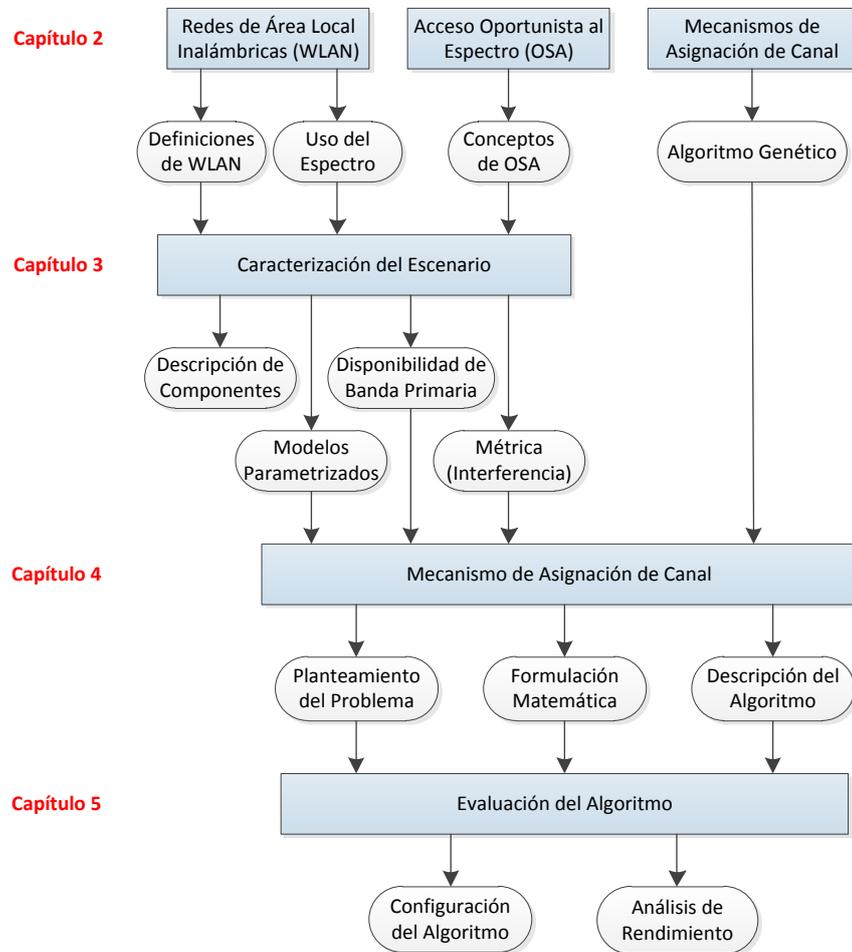


Figura 1.1 Estructura del documento

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

El objetivo de estudio de este capítulo es explicar los fundamentos teóricos utilizados en las tecnologías de redes de área local inalámbrica (WLAN) y en la de acceso oportunista al espectro (OSA), además de los conceptos básicos que envuelven a los mecanismos de asignación canal y sobre todo el principio y funcionamiento de los algoritmos genéticos.

2.1 REDES INALÁMBRICAS IEEE 802.11

Una red inalámbrica es un sistema de comunicación de datos que permite a varios dispositivos (ubicados dentro de una misma área de cobertura) conectarse de forma inalámbrica, sin la necesidad de conexiones físicas por cable. Las redes inalámbricas transmiten y reciben datos a través de ondas electromagnéticas usando el “espacio

libre” como medio de transmisión, en vez de limitarse al cable de par trenzado, al cable coaxial o a la fibra óptica, utilizados en las redes LAN convencionales [21].

2.1.1 CAPAS UTILIZADAS

La tecnología usada en WLAN se basa en las especificaciones del IEEE 802.11, que es un estándar internacional que define las características de una red de área local inalámbrica, desarrollados por el Comité de Normas LAN / MAN (IEEE 802), del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y se conoce comúnmente como Wi-Fi. Wi-Fi es una marca comercial de la Wi-Fi Alliance, que es una organización que prueba y certifica que cumple con el estándar IEEE 802.11x [22]. IEEE 802.11 se define dentro de la arquitectura de protocolo desarrollado como un estándar IEEE 802, que utiliza los niveles inferiores del modelo OSI para las conexiones inalámbricas que utilizan ondas electromagnéticas, la cual consiste en tres capas: control de enlace lógico (LLC), el control de acceso al medio (MAC) y la física, como se aprecia en la figura 2.1 [23], [25].

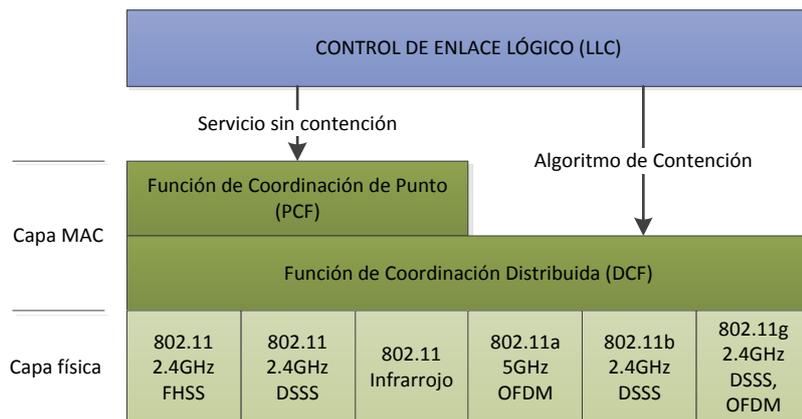


Figura 2.1 IEEE 802.11 Arquitectura de Protocolo [23]

La capa física define la modulación de las ondas de radio y las características de señalización para la transmisión de datos, mientras que la capa de enlace de datos, conformada por las subcapas: control de enlace lógico (LLC) y control de acceso al medio (MAC), define la interfaz entre el bus del equipo y la capa física, en particular un método de acceso parecido al utilizado en el estándar Ethernet, y las reglas para la comunicación entre las estaciones de la red [23], [24].

2.1.2 CARACTERÍSTICAS

El estándar 802.11, que define el protocolo para redes Inalámbricas, fue aprobado en Junio de 1997, el cual fue planteado para trabajar en las bandas reservadas para uso no

comercial de radiofrecuencia en áreas: Industrial, Científica y Médica; o también conocida como banda ISM (por sus siglas en inglés), que utilizan distintas bandas de frecuencia tales como: 900 MHz, 2.4 GHz y 5 GHz; para este caso se lo diseñó para operar a 2.4 GHz con tasas de transmisión de datos de 1 Mbps y 2 Mbps, como se puede apreciar en la Tabla 2.1 [22], [23], [25].

Las bandas ISM son compartidas por gran variedad de sistemas, los cuales no requieren una licencia para operar dentro de estas frecuencias. Esto las hace ideales para un sistema general de uso libre [22].

Además, la Tabla 2.1 nos muestra que ya para Septiembre de 1999 se habían aprobado simultáneamente los primeros dos estándares de WLAN, el IEEE 802.11b y el IEEE 802.11a. El IEEE 802.11b, que es una extensión del protocolo original (IEEE 802.11), opera a la misma frecuencia de 2.4 GHz, pero ahora con una tasa máxima de transmisión de datos de 11 Mbps, usando una técnica de modulación conocida como Espectro Ensanchado Por Secuencia Directa, en inglés Direct

Sequence Spread Spectrum (DSSS). El IEEE 802.11a fue diseñado para operar en la banda ISM de 5GHz con una tasa máxima de transmisión de datos de 54 Mbps, usando una técnica de modulación conocida como Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, en inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), que utiliza múltiples señales portadoras a diferentes frecuencias, enviando algunos de los bits en cada uno de los canales [15], [22], [23], [25]. Diversas variantes del estándar se presentan a continuación.

Tabla 2.1 Principales estándares de IEEE 802.11

	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Fecha de aprobación	Jun 1997	Sep 1999	Sep 1999	Jun 2003	Oct 2009	Nov 2011
Frecuencia (GHz)	2.4	5	2.4	2.4	2.4, 5	5
Máxima Tasa de Datos (Mbps)	1, 2	54	11	54	600	1000
Modulación	DSSS	OFDM	DSSS	DSSS, OFDM	DSSS, OFDM	BCC
Ancho de Banda (MHz)	20	20	20	20	20, 40	20, 40, 80, 160
Alcance aproximado en interiores (m)	20	35	35	38	70	-
Alcance aproximado en exteriores (m)	100	120	140	140	250	-

2.1.3 COMPONENTES Y ARQUITECTURA

El estándar IEEE 802.11 posee una estructura que consta de diversos componentes que interactúan entre sí para ofrecer una red WLAN que admite la movilidad de STAs de forma transparente a las capas superiores.

A continuación, se detallan los componentes principales y la arquitectura que presentan las redes WLAN del estándar IEEE 802.11 [22].

Estación (STA): Si se habla de redes LAN cableadas, se conoce que una dirección generalmente equivale a una dirección física, pero para redes WLANs no siempre es lo mismo. Para el estándar IEEE 802.11 la unidad direccionable se la conoce como una estación (STA), la cual es una entidad lógica que es una instancia individualmente direccionable de una interfaz de control de acceso al medio y la capa física para el medio inalámbrico, es decir no es más que el lugar de donde se origina y se recepta un mensaje [15], [22].

Punto de acceso (AP): Es una entidad que incorpora una estación (STA) y proporciona acceso a los servicios de distribución por el medio inalámbrico para estaciones asociadas [15].

Conjunto de servicios básicos (BSS): Es considerado como el bloque de construcción básico de una LAN IEEE 802.11. La Figura 2.2a muestra un BSS que posee como miembros a cuatro STAs, los óvalos describen la zona de cobertura dentro de la cual todos los miembros STAs de la BSS puede mantener la comunicación. Un BSS construido alrededor de un punto de acceso (AP) dedicado a la gestión de la BSS se lo conoce también como una infraestructura BSS, y está representado por BSS₂ y BSS₃ en la Figura 2.2b [15].

Conjunto de servicios básicos independiente (IBSS): Se refiere al conjunto de servicios básicos (BSSs) que constituye una red en sí misma, en la que no tienen acceso a un sistema de distribución (DS) y donde las estaciones se pueden comunicar directamente entre sí en una red ad-hoc. En la

Figura 2.2a, BSS_i puede ser considerada como una IBSS [15], [25].

Sistema de distribución (DS): Es un sistema usado para interconectar, a través de sus puntos de acceso (APs), un conjunto de conjuntos de servicios básicos (BSSs) y redes de área local (LANs) integradas para crear un conjunto de servicios extendido (ESS), Figura 2.2b [15].

Conjunto extendido de servicios (ESS): Denota un conjunto de uno o más conjuntos de servicios básicos interconectados (BSSs), que se muestra como un solo BSS para la capa de control de enlace lógico (LLC), en cualquier estación (STA) asociada con uno de aquellos BSSs, Figura 2.2b [15].

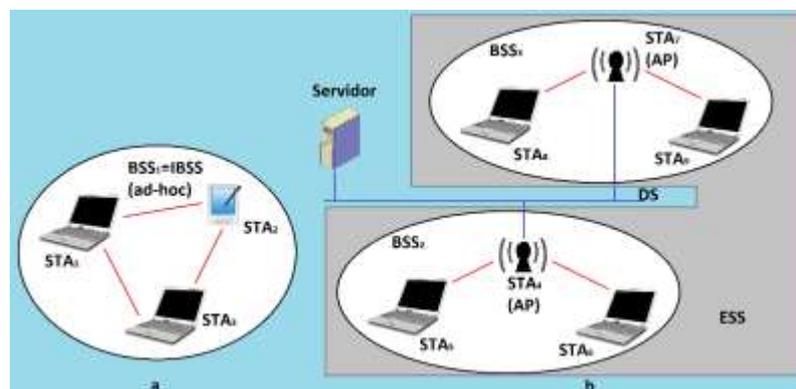


Figura 2.2 IEEE 802.11 Componentes y Arquitectura [22]

2.1.4 GESTIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA EN WLAN

Según lo mencionado previamente, las redes WLAN están basadas en el estándar IEEE 802.11 y operan en las bandas ISM. Estas bandas se definen en la Tabla 2.2 [26].

Cada rango de frecuencia presenta distintas particularidades. Por ejemplo si se opera en segmentos de frecuencias bajas se tendrá una mejor área de cobertura, pero el ancho de banda será limitado, es decir la tasa de datos es baja. En cambio, si se opera en segmentos de frecuencias altas se tendrá un ancho de banda menos congestionado y con una mayor tasa de datos, pero el área de cobertura será menor, ya que se está propenso a tener una atenuación mayor por presencia de objetos sólidos [22], [26].

Tabla 2.2 Bandas ISM

Banda	900 MHz	2.4 GHz	5 GHz
Rango	902 a 928 MHz	2.4 a 2.4835 GHz	5.15 a 5.35 GHz 5.725 a 5.825 GHz
Estándar	-	IEEE 802.11b/g	IEEE 802.11a

Los dispositivos que operan en bandas sin licencia no necesitan ningún proceso de licenciamiento formal, pero cuando operan en estas bandas, el usuario tiene la obligación de acatar las regulaciones del gobierno en dicha región. Los dominios reguladores en distintas regiones del mundo monitorean estas bandas según diferentes criterios, y los dispositivos WLAN usados en estos dominios deberán cumplir con las especificaciones del dominio regulatorio pertinente. Los reglamentos de la banda 2.4 GHz han sido relativamente constantes, dada la cantidad de tiempo que ha estado en funcionamiento. Como se puede apreciar en la Tabla 2.3, la FCC permite 11 canales en los Estados Unidos, ETSI permite hasta 13 canales en Europa, y Japón permite hasta 14 canales, pero requiere una licencia especial para operar en el canal 14 [15], [26].

El estándar WLAN 802.11 precisa que estos canales se encuentren separados 5 MHz el uno del otro (excepto para los dos últimos canales con 12 MHz de separación) y un ancho de banda de 22 MHz, como se muestra en la Tabla 2.3. Por consiguiente, considerando estas separaciones de ancho de banda y de canales, los canales adyacentes se superponen, de

manera que si los dispositivos están transmitiendo en canales adyacentes, éstos interferirán entre sí, este problema se minimiza si la distancia entre las frecuencias centrales es de al menos 25 MHz para que puedan operar simultáneamente sin interferencia [15], [22], [26].

Tabla 2.3 Canales y frecuencias disponibles por país

Canal	Estados Unidos (FCC)	Europa (ETSI)	Japón	Frecuencia Baja (MHz)	Frecuencia Central (MHz)	Frecuencia Alta (MHz)
1	SI	SI	SI	2401	2412	2423
2	SI	SI	SI	2406	2417	2428
3	SI	SI	SI	2411	2422	2433
4	SI	SI	SI	2416	2427	2438
5	SI	SI	SI	2421	2432	2443
6	SI	SI	SI	2426	2437	2448
7	SI	SI	SI	2431	2442	2453
8	SI	SI	SI	2436	2447	2458
9	SI	SI	SI	2441	2452	2463
10	SI	SI	SI	2446	2457	2468
11	SI	SI	SI	2451	2462	2473
12	NO	SI	SI	2456	2467	2478
13	NO	SI	SI	2461	2472	2483
14	NO	NO	SI	2473	2484	2495

Teniendo en cuenta el solapamiento entre los canales, en la Figura 2.3 se muestra que el número máximo de canales que no se superponen en la banda ISM de 2,4 GHz es tres. Estos tres canales no necesariamente son los mismos, se pueden hacer distintas combinaciones teniendo en cuenta las regulaciones que deben de cumplirse en cada país. La combinación más usada en Estados Unidos es la 1, 6, 11, ya que la FCC solo permite 11 canales como lo vimos

anteriormente. A partir de esta figura, los otros conjuntos de canales no solapados pueden ser 2, 7, 12, o 3, 8, 13 o 4, 9, 14 (si se permite) o 5, 10 (y posiblemente 14 si se permite) [7], [22].

También se define una máscara espectral que especifica la distribución de potencia permitida a través de cada canal, por lo cual la energía transmitida por cualquier transmisor debe caer dentro de los niveles definidos por la máscara, es decir establece los niveles de energía máxima que el transmisor puede emitir en un espectro dado. A los 11 MHz de distancia de la frecuencia central, la energía debe ser 30 dB menor que el nivel de señal máxima, y a los 22 MHz de distancia de la frecuencia central, la energía debe estar 50 dB por debajo del nivel máximo. Nótese que, mientras esté más lejos de la frecuencia central, los niveles de energía caen más; sin embargo, cierta energía aún está presente y puede provocar interferencias en algunos canales [15], [22], [26], [27].

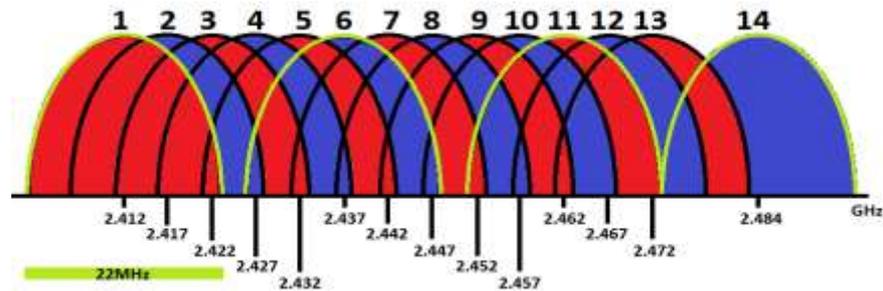


Figura 2.3 Superposición de canales WLAN a 2.4GHz [7]

2.2 ACCESO OPORTUNISTA AL ESPECTRO

El acceso oportunista al espectro (OSA) es una técnica que se basa en los mecanismos de la radio cognitiva que posibilita que un espectro con licencia se abra a los usuarios secundarios al mismo tiempo que limita la interferencia percibida por los usuarios primarios (licenciados) [17], [22]. Es posible obtener un manejo más eficiente del espectro de radio, aplicando esta estructura de acceso oportunista.

2.2.1 INTRODUCCIÓN

Este modelo fue propuesto por primera vez por el Dr. Joseph Mitola [28], [29] bajo el término “spectrum pooling” y luego fue explorado por el programa DARPA Next Generation (xG) bajo el término OSA. Mitola consideró que la coexistencia de las redes de usuarios secundarios con el sistema del usuario primario es factible siempre que un conjunto de procedimientos

denominado ciclo cognitivo [29] pueda ser implementado de manera fiable por los usuarios secundarios.

La radio cognitiva (CR) constituye un criterio mucho más amplio, que puede ser aplicado a diversas circunstancias de las redes de comunicaciones de radio, con el fin de que esas redes puedan mejorar su rendimiento mediante la aplicación de técnicas cognitivas [22]. Por lo tanto, OSA se considera una aplicación importante de la radio cognitiva, que proporciona la capacidad de compartir el canal inalámbrico con usuarios con licencia de manera oportunista [30].

2.2.2 CARACTERÍSTICAS

La radio cognitiva se compone de un sistema de radio que permite que se cambien los parámetros del transmisor basándose en lo que se percibe a partir de su medio ambiente en el cual se encuentra operando. A diferencia de los sistemas de radio convencionales los dispositivos de radio cognitiva poseen dos características importantes: capacidad cognitiva y reconfigurabilidad [30], [31].

Capacidad Cognitiva

La capacidad cognitiva de una radio cognitiva posibilita la interacción en tiempo real con su entorno para determinar los parámetros de comunicación apropiados y adaptarse al medio de radio dinámico [30], con el fin de tener comunicaciones altamente fiables cuando y donde sea necesario, y una utilización eficiente del espectro [31].

Como se lo mencionó en 2.2.1, para que los usuarios secundarios puedan convivir con los usuarios primarios, se necesita de un conjunto de operaciones que deben ser ejecutadas. Basado en ciclo cognitivo propuesto en [29], se propone un conjunto de funciones de gestión del espectro para que los usuarios secundarios puedan operar [22], [30], [32]: detección del espectro, decisión del espectro, uso compartido del espectro, y la movilidad del espectro. La Figura 2.4 muestra un esquema del conjunto de funciones de gestión del espectro propuesto.

Estas funciones otorgan a los usuarios secundarios la capacidad para detectar que parte del espectro está disponible,

seleccionar el mejor canal de frecuencia, coordinar el acceso a este canal con otros usuarios y a su vez desocupar la banda de frecuencia con licencia cuando aparezca un usuario primario [32].



Figura 2.4 Funciones de gestión del espectro de CR [34]

Detección del espectro

La detección del espectro es una técnica que le permite al usuario secundario supervisar el espectro disponible de su entorno, obtener información referente a dichas bandas, y luego detectar agujeros del espectro [32].

Cada usuario CR está diseñado para tener conocimiento y ser sensible a los cambios en su entorno, que le permite adaptarse al medio ambiente mediante la detección de agujeros de espectro sin causar interferencia a la red primaria [33], [34].

Decisión del espectro

La decisión del espectro tiene mucha relación con las propiedades del canal y el funcionamiento de los usuarios primarios. Este concepto le otorga a las redes de radio cognitiva la capacidad de decidir cuál es la mejor banda de frecuencia del espectro disponible que cumplan con los requisitos de QoS de las aplicaciones, la cual se ve afectada por las actividades de otros usuarios de CR en la red [32], [35].

Uso compartido del espectro

Debido a que pueden existir varios usuarios intentando acceder al espectro disponible, el acceso a una red CR debe ser coordinado para evitar que varios usuarios choquen en porciones solapadas del espectro.

La convivencia entre los usuarios primarios y secundarios y la amplia gama del espectro disponible son dos puntos importantes en la compartición del espectro que requiere la coordinación de intentos de transmisión entre usuarios de CR [22]. Basado en esto el trabajo de compartición de espectro se enfoca en cuatro puntos: la arquitectura, el comportamiento de asignación del espectro, la técnica de acceso al espectro y el alcance [32].

La arquitectura puede ser distribuida o centralizada. La distribuida basa la asignación del espectro y el acceso en las políticas locales (o posiblemente mundiales) que se realizan por cada nodo de forma distribuida [36]. Para el caso de la centralizada los procedimientos de asignación y de acceso al espectro son controlados por una entidad central [37].

El comportamiento de asignación del espectro se clasifica en cooperativo o no cooperativo. En el primer caso, se explotan las medidas de interferencia de cada nodo, de tal manera que se considera el efecto de la comunicación de un nodo con otros nodos, mientras que en el no cooperativo se considera solo un

único nodo, es decir que la interferencia en otros nodos de CR no se considera [38].

La técnica de acceso al espectro puede ser por compartición del espectro superpuesto o por compartición del espectro subyacente. En el primero, los nodos acceden a la red utilizando una porción del espectro que no ha sido utilizado por usuarios primarios, lo que minimiza la interferencia a la misma, para el otro caso las técnicas de espectro ensanchado son explotadas de tal forma que la transmisión de un nodo CR es considerado como ruido por los usuarios primarios [39].

Finalmente, el alcance se centra en dos tipos de soluciones: la compartición del espectro dentro de una red RC (uso compartido del espectro de intranetwork) y entre múltiples redes CR coexistente (uso compartido del espectro de internetwork) [30].

Movilidad del espectro

En redes CR cada usuario es considerado como un visitante del espectro, es decir que si la porción específica del espectro en

uso es requerido por un usuario principal, la comunicación deberá continuar en otra porción libre del espectro. Debido a esto, lo que se propone es de garantizar una transición fluida y rápida que conduce a una mínima degradación del rendimiento [32].

El proceso es el siguiente, primero un usuario secundario capta el mejor espectro disponible, y a partir de este, selecciona el mejor canal como su nuevo canal de operación, luego si se presenta la presencia del usuario primario en el canal, entonces el usuario CR necesariamente tiene que cambiar su banda de operación [30].

Reconfigurabilidad

La reconfigurabilidad es la capacidad de ajustar los parámetros de funcionamiento para la transmisión sobre la marcha y sin ninguna modificación en los componentes de hardware. Esta capacidad permite a la radio cognitiva adaptarse fácilmente al entorno de radio dinámico. Más específicamente, la radio cognitiva puede ser programada para transmitir y recibir en diferentes frecuencias y para utilizar diferentes tecnologías de

acceso de transmisión soportados por su diseño de hardware [40].

Varios parámetros re-configurables que pueden ser adaptados en la radio cognitiva son los siguientes: frecuencia de operación, tipo de modulación, potencia de transmisión y tecnología de la comunicación.

Cabe recalcar que los parámetros de transmisión de una radio cognitiva pueden ser reconfigurados no sólo al inicio de una transmisión, sino también durante la transmisión [30].

2.2.3 COMPONENTES Y ARQUITECTURA

Una descripción completa de la arquitectura de la red RC es fundamental para el desarrollo de protocolos de comunicación que aborden los desafíos del espectro dinámico. Los componentes de la arquitectura de una red de radio cognitiva (CRN) se muestran en la Figura 2.5 y se describen a continuación [32], [34].

La arquitectura de la red RC se compone de la red primaria y la red secundaria. La red primaria (red con licencia) está compuesta por un conjunto de usuarios primarios (PU) que están autorizados para operar en ciertas bandas de frecuencia, y una o más estaciones base primarias que controlan las actividades de los PU, las cuales no deben verse afectada por los usuarios sin licencia. La red secundaria (red CR dinámica, red de acceso de espectro, o red sin licencia) no tiene autorización para operar en una banda deseada, por lo que necesita ciertas capacidades adicionales para poder compartir la banda con licencia, estas funcionalidades ya se discutieron en la Sección 2.2.2. La red CR también puede contar con su propia estación base secundaria que proporciona servicio directo a los SUs [37], [41].

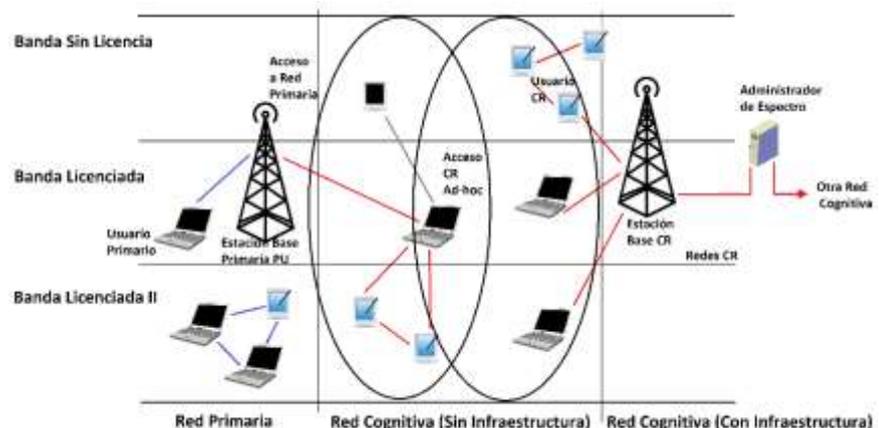


Figura 2.5 Arquitectura de la red Radio Cognitiva [22] [32]

La heterogeneidad del espectro

La heterogeneidad del espectro se refiere a la capacidad que poseen los usuarios CR de poder usar dos tipos de operaciones: la operación en las bandas con licencia que son usadas por los usuarios primarios y la operación en las bandas no licenciadas, a través de la tecnología de acceso de banda ancha [32], [42].

Cuando los SUs operen en bandas con licencia estos se dedican a la detección de PUs en dichas bandas, la capacidad de la misma depende de la interferencia que causan a los PUs cercanos. Debido a que los usuarios con licencia tienen prioridad para el uso su banda, cuando estos aparecen para utilizarlas, los SUs deben moverse a otra porción del espectro.

Para el otro caso, todos los SUs tienen el mismo derecho para acceder a las bandas sin licencia, ya que no existen PUs en esta banda; para lograr esto, técnicas de compartición del espectro son implementadas para que los SUs puedan competir por el acceso.

La heterogeneidad de la red

Los usuarios de CR pueden realizar tres tipos de acceso diferentes [30]:

1. Acceso a una red secundaria: Sin importar en que banda del espectro se encuentren (primaria o secundaria), los usuarios de CR pueden comunicarse con su propia estación base secundaria.
2. Acceso a una red ad-hoc secundaria: Los usuarios de CR están conectados con otros usuarios de RC mediante una conexión ad-hoc en las bandas con o sin licencia del espectro.
3. Acceso a la red principal: los usuarios secundarios pueden acceder a la estación base primaria a través de la banda con licencia, pero requieren de un control de acceso al medio de adaptación de protocolo (MAC).

2.2.4 SISTEMAS DE DETECCIÓN DE CANALES

Como ya lo hemos mencionado, la técnica de OSA permite el uso compartido del espectro; en otra palabras, brinda la oportunidad de usar los segmentos no utilizados de la bandas de espectro con licencia sin afectar a los usuarios primarios [43]. Estos segmentos no utilizados también se conocen como espacios en blanco (WS) o agujeros de espectro (SH) [32], [44]. En diversos trabajos de investigación manifiestan que no se utilizan de manera eficiente ciertos segmentos del espectro electromagnético, enfocándose específicamente, en los utilizados para brindar los servicios de televisión (bandas VHF y UHF), lo que quiere decir que ciertos canales de televisión no están siendo utilizados en algunas zonas geográficas [45]. A estos segmentos no utilizados del espectro de TV (470-790 MHz en Europa) se los conoce como Espacios en Blanco de TV (TVWS) y están siendo considerados por las entidades reguladoras como las posibles soluciones a la escasez de espectro [45], [46].

El acceso oportunista a estos espacios en blanco por parte de los usuarios secundarios conlleva dos aspectos importantes a seguir:

1. La detección de los agujeros de espectro disponibles en bandas con licencia (por ejemplo, las bandas de televisión).
2. El uso del espectro disponible siguiendo los requerimientos impuestos por el ente regulador, cuyo propósito es proteger a los usuarios primarios de interferencias mal intencionadas [22].

Varias entidades reguladoras ya han propuesto diversos mecanismos de detección de canales para que los usuarios secundarios puedan encontrar WS. Estos son: la detección del espectro, la ubicación geográfica con bases de datos y la señal de baliza [47], [48]. El primer mecanismo ya ha sido discutido en la Sección 2.2.2.

Ubicación Geográfica con bases de datos: Este método permite a los usuarios secundarios consultar una base de datos centralizada que contiene la información de la ubicación geográfica de sus vecinos, a fin de establecer si existe algún TVWS disponible, que puede ser utilizado sin causar interferencia a otros servicios [49].

Señal de baliza: Este mecanismo permite a los usuarios secundarios transmitir en un canal solo si han recibido previamente la señal de baliza con información sobre si el canal está disponible. Por lo tanto, se requiere una infraestructura dedicada para emitir señales de baliza, las cuales son operadas por el titular del espectro [44].

Entes reguladores (por ejemplo, la FCC), han decidido utilizar la base de datos de geo-ubicación como única técnica cognitiva debido a que los otros mecanismos son menos viables para detectar espacios blancos de espectro [44]. A pesar de esto, la FCC, promueve el uso de la detección de espectro con dispositivos secundarios para determinar la calidad de los canales y para impulsar la compartición del espectro entre los dispositivos secundarios [48].

Para este trabajo se utilizan los mecanismos de ubicación geográfica con una base de datos centralizada, la cual envía al usuario secundario la información necesaria sobre la disponibilidad de la banda primaria en su área circundante.

2.2.5 SISTEMAS O PROYECTOS

Actualmente, se está investigando los diversos contextos en los cuales el modelo OSA podría ser aplicado [43]. Diversas acciones se han llevado a cabo sobre el uso de TVWS. Por ejemplo, el estándar IEEE 802.11af ha sido sugerido para operar en ambientes con conexión inalámbrica de corto alcance sobre TVWS. Este estándar se conoce también como White-fi, en referencia al uso de la tecnología Wi-Fi dentro de los espacios en blanco de TV usando tecnología de radio cognitiva. Para que los dispositivos IEEE 802.11af puedan hacer uso de TVWS, se necesita que no interfieran a los usuarios primarios; para esto, el grupo de trabajo IEEE 802.11af es el responsable de definir un estándar para la aplicación del presente (iniciado en 2010) [50].

Considerando esto, los dispositivos 802.11af operarán en frecuencias por debajo de 1 GHz (es decir TVWS). Esta situación mejora las características de propagación, ya que las señales son fácilmente absorbidas y además se puede conseguir un mayor rango de cobertura de las señales transmitidas en comparación con el tradicional 802.11 que opera en 2.4GHz. Para proporcionar tasas de transmisión de

datos similares a los alcanzados por las tecnologías Wi-Fi, será necesario agregar varios canales de televisión. La disponibilidad de canales primarios se lo obtiene de un control de base de datos de geolocalización [50].

El primer estándar que fue desarrollado incorporando plenamente el concepto de CR, así como el primer estándar de interfaz aéreo relacionado con CR es el IEEE 802.22 (finalizado en el 2011), también llamado estándar para Redes de Áreas Regionales Inalámbricas (WRANs). Éste está diseñado para funcionar en bandas de TV (UHF o VHF) disponibles entre 54 y 862 MHz (escalable a 41 - 910 MHz), pero sólo las frecuencias por debajo de 698 MHz está permitido por los reglamentos de la FCC en los EE.UU. Los anchos de banda de los canales utilizados por esta norma incluyen los valores de 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz, que son compatibles con varios estándares de televisión de todo el mundo [51], [52], [53].

Con el fin de mejorar los mecanismos de coexistencia para el funcionamiento sin licencia, se creó el estándar IEEE 802.16h. Esta norma comenzó para bandas sin licencia, con un enfoque

en 3.65 GHz y luego emigró a TVWS. El objetivo de ésta es el uso de tecnología inteligente que permite a varios sistemas compartir recursos, debido a esto se permite la coexistencia entre los sistemas exentos de licencia basado en el estándar IEEE 802.16 con el fin de satisfacer los requisitos de calidad de servicio (QoS) [52].

2.4 MECANISMOS DE ASIGNACIÓN DE CANAL

En los últimos años, la implementación de redes WLAN basadas en el estándar 802.11 han tenido un gran incremento en las zonas urbanas. Debido a esto, se presenta la congestión de la banda ISM que puede causar problemas de rendimiento en las redes inalámbricas, por lo que resulta indispensable implementar mecanismos que ayuden a mejorar su desempeño. Uno de los principales mecanismos a tomar en cuenta es la técnica de asignación de canal, la cual consiste en que un canal de frecuencia es asignado a cada punto de acceso para su uso [22].

2.4.1 CARACTERÍSTICAS

Los tipos de despliegues de redes WLAN pueden ser clasificados como coordinados o no coordinados, según el modo en que son administrados:

Para despliegues coordinados, se cuenta con una entidad central que monitorea y gestiona toda la información del entorno de las redes WLAN (es decir, APs y STAs). Este escenario se lo conoce como computación centralizada, en el cual la entidad central puede llevar a cabo los mecanismos para resolver el problema de asignación de canal. Algunos ejemplos son los despliegues en el campus universitario, aeropuertos y oficinas [54].

Por otro lado, las implementaciones no coordinadas operan en carencia de un control central, de manera que cada punto de acceso sólo conoce su propia información del entorno, y no la de los otros puntos de acceso, y viceversa [55]. Este escenario se lo conoce como computación distribuida, en el cual cualquier mecanismo para resolver el problema de asignación de canal sólo puede ser realizado por cada AP. Un ejemplo podría ser el despliegue de redes WLAN en lugares tales como los barrios residenciales o puntos de acceso privados gestionados por diferentes proveedores de servicios (por ejemplo, restaurantes, cafeterías, etc.) [54], [56]. Sin embargo, los puntos de acceso implementados en un despliegue coordinado también podría ser capaces de ejecutar la computación distribuida [22]. En la

Figura 2.6 se muestra un esquema que describe la relación entre los conceptos ya mencionados.

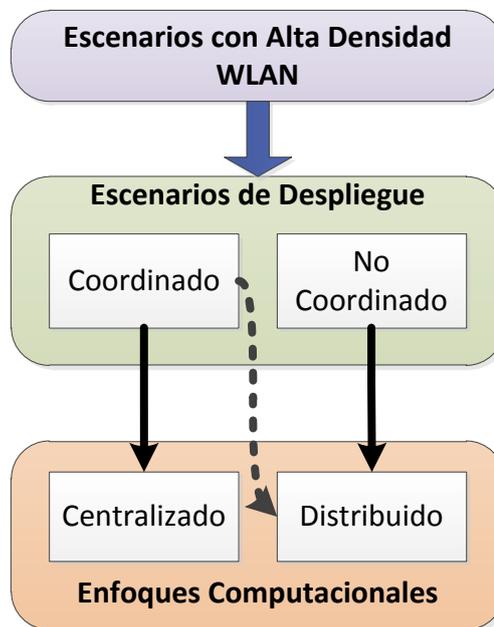


Figura 2.6 Despliegues WLAN [22]

Además, se han propuesto varias técnicas para hacer frente a este tipo de problemas de rendimiento. Para despliegues de gestión centralizada, una técnica común es lo que se conoce como control de asociación o equilibrio de carga, en el que una unidad principal asocia los STAs con los APs con el propósito de equilibrar el tráfico en cada red [57]. En cambio, para despliegues no coordinados se usan técnicas tales como el control de potencia [58], [59] y una cuidadosa detección de

portadora [60], en la cual la potencia de transmisión se sintoniza de forma dinámica, y la detección de una portadora innecesaria se evita, respectivamente. Sin embargo esta sección se enfoca en las diversas técnicas de asignación de canales que existen.

También hay que considerar si la asignación de canal es estático o dinámico [54]. El primero se refiere a la asignación de canales para el despliegue inicial de las redes WLAN y el segundo consiste en la reasignación o ajuste del canal.

2.4.2 TÉCNICAS O ESQUEMAS

A continuación se presentan varias técnicas de asignación de canal existentes que se basan en los conceptos antes mencionados [22].

Con el fin de obtener soluciones óptimas para el problema de asignación de canal en despliegues WLAN se aplican las técnicas de optimización. Una de ellas es la programación lineal entera (ILP), la cual es una técnica matemática utilizada con frecuencia para resolver problemas de optimización y de

asignación de recursos en general [61], [62]. Existen algoritmos para resolver este problema de optimización de forma óptima (por ejemplo, los algoritmos branch and bound) [63], pero no son eficientes para un gran número de puntos de acceso, dado que éstas requieren altos esfuerzos computacionales [64].

Para un entorno oportunista como el propuesto en [65], los autores abordan la formulación del problema como ILP cuyas limitaciones equilibran la carga de la red en las dos bandas (es decir, teniendo en cuenta un escenario oportunista), y también asignan los canales para los usuarios secundarios dentro de una red de malla.

Del mismo modo en [66] y [67]; los autores plantean un escenario oportunista considerando el problema como una programación lineal no entera (es decir, que las variables, la función objetivo y las restricciones no son lineales) a fin de maximizar la utilización del espectro. Además, ambos trabajos consideran que los canales no se solapan y no contemplan la heterogeneidad del espectro ni la priorización de canales.

Considerando los problemas de cálculo antes mencionados, existen varios algoritmos heurísticos basados en técnicas de asignación de recursos bien conocidos que pueden resolver el problema de asignación de canal en cortos tiempos de ejecución [54]. Los algoritmos heurísticos basados en técnicas de coloreado de grafo se utilizan a menudo para asignación de canal [68], donde la red es representada como un grafo compuesto por vértices y aristas. Los APs son los vértices, la unión entre APs representa la interferencia entre los puntos de acceso y los colores se refieren a los canales asignados.

Así es como en [7], los autores proponen dos algoritmos de asignación de canal heurísticos. Estos se basan en la construcción de un árbol de expansión mínima (MST) del gráfico de la red. En este trabajo, se considera la superposición entre canales. De acuerdo con ello, esta técnica necesita saber información sobre el entorno de todos los puntos de acceso para ser considerado como coordinado, estático y centralizado.

Los autores en [69] para resolver el problema de asignación de canal en las redes WLAN utilizan el conocido algoritmo

DSATUR (grado de saturación), que es muy utilizado por la comunidad científica. Se basa en el concepto de un grado de saturación (es decir, el número de vecinos de diferente color de un vértice).

Otras técnicas usadas son el LCCS (Búsqueda del canal menos congestionado) [70] y el Hminmax [71]. En el primero un AP elige para operar en el canal con el mínimo número de clientes asociados. Tenga en cuenta que cada cliente asociado con un determinado canal está vinculado a otro AP. Por otro lado en el Hminmax un AP calcula para cada canal disponible la interferencia máxima que tendría con sus vecinos y selecciona el canal con el valor mínimo de interferencia máxima. Estos algoritmos pueden ser considerados como dinámicos, distribuidos y no coordinados.

El simulated annealing (SA) es un meta-heurístico probabilístico para el problema de optimización global de encontrar una buena aproximación para el óptimo global de una determinada función en un gran espacio de búsqueda [72]. En [73], los autores presentan una versión distribuida de SA para resolver

el problema de asignación dinámica de canales en las redes WLAN de alta densidad. El objetivo es encontrar una asignación de canal adecuado, de tal manera que se minimiza la interferencia total.

Para resolver el problema de la asignación de canal en las redes inalámbricas, incluyendo los que tienen acceso oportunista, los autores en [74] presentan un debate acerca de los enfoques y retos que han sido utilizados por varios investigadores, considerando el uso eficiente de los canales de comunicación disponibles y los diferentes problemas de interferencias para el entorno del sistema inalámbrico y redes basadas en radio cognitiva.

Este trabajo se basará en el desarrollo de una conocida técnica heurística usada por la comunidad científica para la asignación de recursos como son los algoritmos genéticos, comúnmente utilizados en problemas de optimización complejos [75].

El algoritmo genético se utiliza para buscar el espacio de todos los subconjuntos posibles del conjunto solución completo que

incluye todas las características. El conjunto de características se codifica como una cadena binaria que cada bit representa la presencia o ausencia de una característica particular. La precisión de la clasificación se utilizará como fitness. El algoritmo genético da una mejor precisión de clasificación que el método de puntuación con la necesidad de un mayor número de iteraciones necesarias y un mayor número de funciones requeridas en el conjunto de características reducido [75]. También pueden ser utilizados para seleccionar un nuevo conjunto de características que combina las originales y las nuevas que son creadas mediante la aplicación de las operaciones aritméticas a las características originales [76], [77]. En la sección 2.5 se explica con mayor detalle los conceptos claves y el funcionamiento de esta técnica de resolución de problemas.

2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

En esta sección se explica los fundamentos teóricos en los que se basan los algoritmos genéticos, los cuales serán claves para la implementación del mecanismo de asignación de canal.

2.5.1 INTRODUCCIÓN

Los algoritmos genéticos (GA) son métodos muy usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, estos se basan en principios biológicos de reproducción sexual y en la supervivencia del más apto [78].

El algoritmo parte de un conjunto de individuos inicial conocido como población inicial y obtenida de manera aleatoria. Cada uno de estos individuos representa una posible solución al problema y evolucionarán a fin de adaptarse de mejor medida tras el paso de cada nueva generación, tal como los esquemas de selección natural planteados por Darwin [79].

Estos algoritmos fueron desarrollados por John Holland, quien desarrolló técnicas que imitaban el funcionamiento de la selección natural. De forma general, un algoritmo genético consiste de una población de soluciones representadas mediante códigos de manera similar a los cromosomas. Cada cromosoma tendrá cierto valor característico que le otorgará mayor o menor probabilidades de reproducción. Los genes de los individuos mejor adaptados serán los que se propagarán a

un número cada vez mayor de individuos en las sucesivas generaciones.

La Figura 2.7 muestra el esquema a seguir para la implementación de un algoritmo genético, primero se empieza con una codificación del problema a resolver, luego se analiza la estructura del algoritmo principal que va a contener a los operadores genéticos, los cuales servirán para analizar el rendimiento de la función de evaluación.

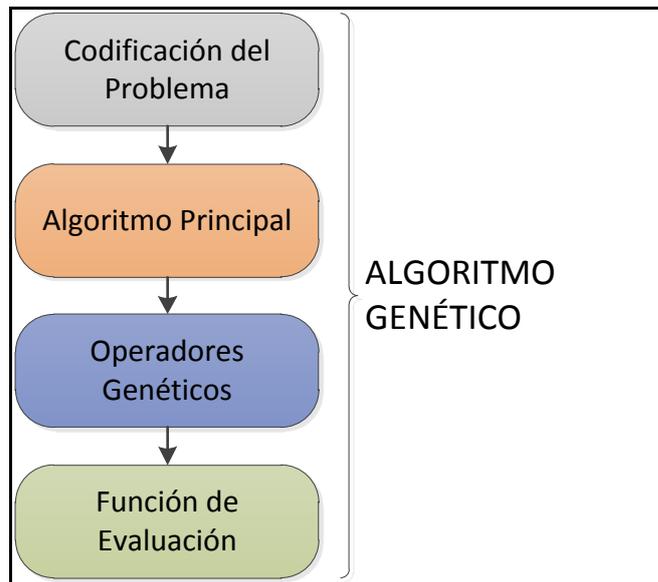


Figura 2.7 Esquema de la implementación de un Algoritmo Genético

2.5.2 CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las posibles soluciones de un problema pueden ser codificadas mediante la asignación de valores a un grupo de parámetros, este conjunto, conocido como “genes” en los algoritmos genéticos, es representado mediante una cadena de valores llamada “cromosoma”, tal como se representa en la Figura 2.7.



Figura 2.8 Individuo genético binario [14]

Aunque desde un inicio la codificación de los problemas se ha realizado mediante valores binarios, también existen codificaciones directamente con valores enteros o reales, y a pesar de considerarse que este tipo de codificación altera la analogía biológica de las codificaciones binarias, permiten la construcción de operadores genéticos específicos para un área de aplicación en particular [80].

2.5.3 ALGORITMO PRINCIPAL

Como se mencionó anteriormente, los algoritmos genéticos se aplican a una población de individuos en donde cada uno representa una posible solución del problema a resolver. Cada individuo está representado por un valor de ajuste que mide la eficiencia de dicho individuo con respecto al problema que se plantea solucionar. Una generación se crea a partir de la anterior gracias a dos operadores de reproducción:

Cruce: Es una reproducción del tipo sexual en la cual se obtiene un par de individuos a partir de la misma cantidad de individuos de la generación anterior. Esto se explicará con más detalle en las secciones siguientes.

Copia: Es una reproducción de tipo asexual en la que un individuo pasa a la siguiente generación sin sufrir cambio alguno en sus genes.

En la Figura 2.8 se presenta el pseudocódigo que esquematiza de forma general el funcionamiento de un algoritmo genético.

```

Inicializar población actual aleatoriamente
MIENTRAS no se cumpla el criterio de terminación
  crear población temporal vacía
  SI elitismo: copiar en población temporal mejores individuos
  MIENTRAS población temporal no llena
    seleccionar padres
    cruzar padres con probabilidad  $P_c$ 
    SI se ha producido el cruce
      mutar uno de los descendientes con probabilidad  $P_m$ 
      evaluar descendientes
      añadir descendientes a la población temporal
    SINO
      añadir padres a la población temporal
    FIN SI
  FIN MIENTRAS
  aumentar contador generaciones
  establecer como nueva población la población temporal
FIN MIENTRAS

```

Figura 2.9 Funcionamiento de un Algoritmo Genético [14]

Los algoritmos elitistas siempre copian los mejores individuos de una generación a la siguiente a fin de evitar su pérdida por cruce de genes. Posteriormente se busca completar la nueva población mediante el uso de los operadores de cruce y copia sobre los individuos actuales. Cuando se generan nuevos individuos, se les realiza una mutación genética basada en una probabilidad P_m muy baja de ocurrir, la cual está entre 0.5% y 2%.

El algoritmo continuará su ejecución continuamente hasta cumplir con el criterio de salida, entre los más comunes se tiene:

- Los mejores individuos son soluciones aceptables del problema que se busca resolver.
- Todos los individuos de una población han convergido a un mismo valor.
- Se ha alcanzado un número de generaciones previamente establecido.

El proceso de mutación aplicado a los descendientes de una generación busca simular los errores de transmisión de ADN producidos en los organismos biológicos.

2.5.4 OPERADORES GENÉTICOS

Para lograr el paso de individuos de una generación a otra es necesaria la aplicación de operadores genéticos. En esta

sección se detallan los más comunes, entre los cuales resaltan los operadores de selección, cruce, copia y mutación.

SELECCIÓN

Como su nombre lo indica, las técnicas de selección son usadas para escoger a los individuos que se reproducirán de entre el total de individuos de una población. A fin de simular lo que ocurre en la naturaleza, se les otorgan más posibilidades de reproducción a los individuos más aptos. Es decir que la función de selección está relacionada con el valor de ajuste (o adaptación al medio) de cada individuo. Es necesario mantener cierto grado de reproducción de los individuos menos aptos, pues en caso contrario la población se volvería homogénea en muy pocas generaciones, lo que impediría la aparición de individuos más aptos que los existentes.

Existen dos tipos de algoritmos de selección, los determinísticos y los probabilísticos. El primero de estos consiste en algoritmos que asignan a cada individuo un número de veces que podrá ser escogido para reproducirse, ejemplos de este tipo de selección son sobranste estocástico, universal

estocástico y muestreo determinístico. Los algoritmos probabilísticos se basan con mayor medida en el azar, entre ellos resaltan la selección por ruleta y por torneo, los cuales se explicarán a continuación.

Selección por ruleta: Este método consiste en asignar un “espacio” de una ruleta a cada individuo de manera proporcional a su ajuste, siendo los mejores individuos quienes obtengan mayor porción de la ruleta con respecto a los peores. La suma de todos los espacios o porcentajes es la unidad, por lo que para seleccionar un individuo sólo es necesario generar un número aleatorio entre $[0,1]$ y escoger al individuo situado en dicha posición de la ruleta. Para facilitar la selección, la ruleta suele estar expresada como una función acumulativa, por lo que el individuo seleccionado será el más pequeño que exceda al valor obtenido aleatoriamente.

Selección por torneo: Este método escoge a los individuos basándose directamente en su valor de ajuste y puede ser torneo determinístico o torneo probabilístico. El torneo determinístico selecciona al azar dos individuos de la población,

de entre los cuales escoge al más apto para reproducirlo. En el probabilístico en cambio, para escoger entre uno de los dos individuos, se plantea una probabilidad de selección según la cual se escoge el uno o el otro.

Si bien se han descrito dos modelos de selección, existen otros como el muestro determinístico, el escalamiento sigma, la selección por jerarquías, etc., etc., los cuales buscan mejorar la eficiencia computacional o la cantidad de veces que los individuos solo seleccionados para reproducirse.

CRUCE

Luego de haberse seleccionado, los individuos deben ser combinados entre sí a fin de mantener sus genes pero creando nuevos individuos que serán insertados en la siguiente generación (e.g. reproducción sexual de los padres). La probabilidad con la que dos individuos se cruzan es alta, suele estar alrededor del 90%.

Existen dos formas de enfocar el cruce de individuos, una es la estrategia destructiva, en la cual los descendientes se

insertarán en la nueva generación a pesar de tener peor valor de ajuste que el de sus padres. La otra estrategia es la no destructiva. En esta, la descendencia sólo pasa a la nueva generación si la bondad de ajuste es mejor que la de sus padres. Se debe notar que en ambas estrategias, los genes de los individuos padres siempre se mantienen en el escenario, por lo que, aunque se opte por una estrategia destructiva, la bondad original de los padres puede ser recuperada en generaciones posteriores. Los algoritmos de cruce en 1 punto, en 2 puntos y uniforme son los más utilizados y se detallan a continuación:

Cruce de 1 punto: Es una sencilla técnica en la cual, a los individuos seleccionados se les dividen los cromosomas en un punto a fin de tener dos segmentos perfectamente diferenciados y conocidos como cabeza y cola. El cruce consiste en intercambiar las colas de ambos individuos a fin de generar los descendientes (los cuales poseerán información genética de ambos padres). En la Figura 2.9 se ilustra el proceso descrito anteriormente.

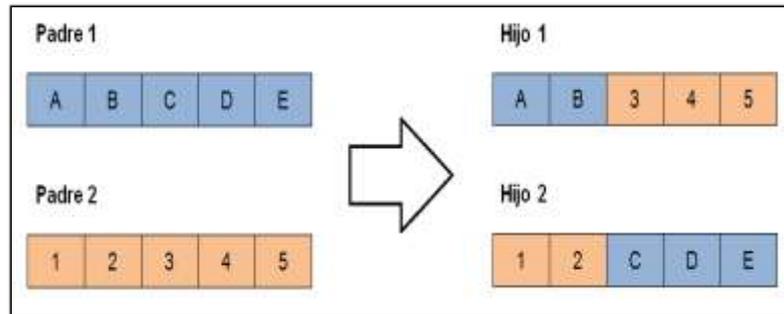


Figura 2.10 Cruce de un punto [14]

Cruce de 2 puntos: Consiste en una extensión del caso anterior, donde en vez de realizar el corte en un solo punto, esta vez se lo realiza en dos. En este tipo de cruce, el segmento intermedio es el que se intercambia a fin de generar la descendencia. La Figura 2.1 grafica este caso.

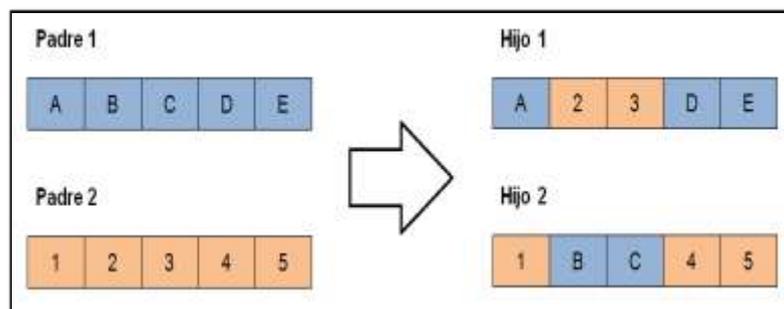


Figura 2.11 Cruce de dos puntos [14]

De forma análoga, se pueden añadir más puntos de cruce a fin de crear cruces multipuntos, sin embargo el aumento de éstos

no necesariamente implica una mejora en el rendimiento del algoritmo genético en general.

Cruce uniforme: El cruce uniforme difiere mucho respecto a los tipos de cruce anteriores. En este caso, cada gen de la descendencia tiene las mismas probabilidades de pertenecer a uno u otro padre.

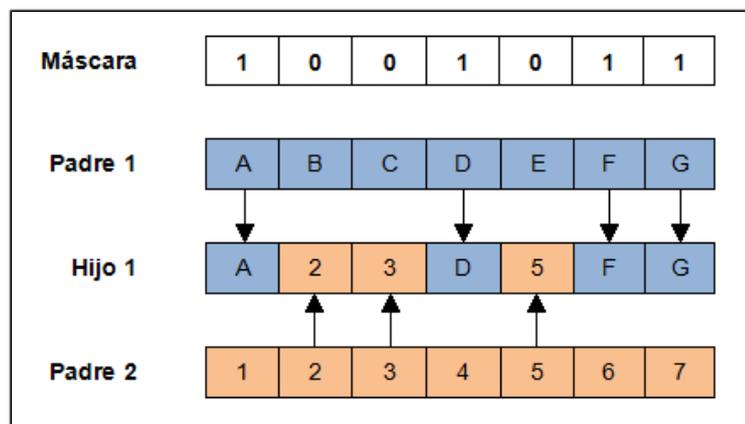


Figura 2.12 Cruce uniforme [14]

Esta técnica se basa en la asignación de una máscara binaria con valores aleatorios a uno de los descendientes y la asignación del complemento de esta al otro descendiente. La existencia de un 1 en un gen en particular indicará a que padre corresponde ese gen, mientras que el 0 indica la necesidad de

incluir el gen del otro padre. La Figura 2.11 muestra claramente este proceso.

COPIA

Otra estrategia reproductiva es la copia. Este tipo de reproducción es asexual y consiste simplemente en copiar un individuo de la generación actual a la generación siguiente. El porcentaje de descendencia producida por copia debe ser pequeño a fin de evitar la convergencia apresurada de toda la población hacia un solo individuo.

Se suele usar el mecanismo de copia en conjunto con el de cruce, esto es, cuando dos individuos seleccionados para transmitir sus genes no logran cruzarse, entonces éstos se insertan directamente en la generación siguiente.

ELITISMO

El elitismo consiste en copiar siempre al mejor o a los mejores individuos de una generación a la siguiente, a fin de garantizar que nunca se dará un paso atrás en la calidad del individuo más apto.

MUTACIÓN

La mutación de un individuo es la alteración de uno de sus genes de forma aleatoria. La mutación puede ser aplicada directamente sobre los individuos de la siguiente generación o como complemento del operador cruce, en cuyo caso se muta uno de los genes de uno o de ambos individuos hijos. Este operador representa el comportamiento genético de los organismos vivos, en donde el paso genético puede transmitirse con cierto error de baja importancia, por ello se suele considerar una probabilidad cercana al 1% de que la descendencia tenga genes mutados.

Existen un sin número de técnicas de mutación dependiendo del problema que se haya modulado con el algoritmo genético, si se trata de una codificación binaria, la mutación consiste simplemente en negar un bit, en cambio para codificaciones decimales puede obtenerse mediante la suma de una cantidad aleatoria, mediante la combinación de dos genes, mediante la multiplicación de un factor en uno de los genes, etc.

2.5.5 FUNCIÓN DE EVALUACIÓN

Para el funcionamiento del Algoritmo Genético es necesario definir un mecanismo que califique a los individuos de una población como mejores o peores soluciones al problema que se busca resolver. Por ello es necesaria la utilización de una función que evalúe la bondad de un individuo en forma numérica (e.g. que obtenga el valor de ajuste de los individuos). Este valor de ajuste es el que se empleará para controlar la aplicación de los operadores genéticos. Se conocen cuatro tipos de ajuste o fitness:

Fitness Puro: Se define para cada problema en particular, en problemas de maximización se puede obtener mediante la diferencia de una función objetivo con el valor específico que proporciona cada individuo, esto es:

$$r(i,t) = \sum_{j=1}^{Nc} |s(i,j) - c(i,j)|$$

$R(i,t)$: Bondad del individuo i en la generación t

$S(i,j)$: Valor deseado para individuo i en el caso j

$C(i, j)$: Valor obtenido por el individuo i en el caso j

N_c : Número de casos

esperando que dicha diferencia se mínima. Por otro lado, los problemas de minimización buscan individuos con un fitness puro reducido, lo que para este ejemplo significaría una diferencia mayor en la función de evaluación.

Fitness Estandarizado: En este caso se busca eliminar la diferencia entre maximización y minimización utilizando una sola función para ambos casos, así:

$$s(i, t) = \begin{cases} r(i, t) & \text{minimización} \\ r_{\max} - r(i, t) & \text{maximización} \end{cases}$$

esto permite obtener siempre la misma proporción, es decir que la bondad de cada individuo siempre será menor cuanto más cercano esté el valor a cero, independientemente de si se esté resolviendo un problema de maximización o minimización. Por

lo tanto, para una generación t , un individuo i siempre será mejor que un individuo j si se obtiene que $s(i,t) < s(j,t)$.

Fitness Ajustado: Es obtenido mediante la modificación del fitness estandarizado, así:

$$a(i,t) = \frac{1}{1 + s(i,t)}$$

esto permite tener sólo valores del intervalo $(0,1]$. Por lo que un individuo tendrá un mejor ajuste de bondad cuanto más cercano sea este de 1.

Fitness Normalizado: Indica la bondad de cada individuo respecto a los demás individuos de la población. Considerando una población con M individuos, la función se puede representar como:

$$n(i,t) = \frac{a(i,t)}{\sum_{k=1}^M a(k,t)}$$

donde n siempre tomará valores del intervalo $[0,1]$. Si bien tiene valores similares al fitness ajustado, en este caso un valor de ajuste cercano a 1 indica que un individuo es una buena solución al problema y además que destaca considerablemente de las demás soluciones. Nótese que la suma de los valores de fitness normalizado de todos los individuos de la población da siempre 1.

CAPÍTULO 3

MODELAMIENTO DEL ESCENARIO

Este capítulo presenta las características del escenario utilizado para probar el mecanismo de asignación de canal mencionado en el capítulo 2. El escenario presenta tanto las características físicas que restringen la ubicación de los Access Points como las características del medio de transmisión inalámbrico, además de las condiciones de disponibilidad de banda primaria.

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en el capítulo anterior, existe la posibilidad de que sistemas de comunicación de corto alcance puedan utilizar espacios vacíos de espectro (disponibilidad espacial o temporal) de bandas licenciadas sin causar interferencia a los usuarios primarios. Por lo

tanto, el escenario planteado en esta tesis, considera la posibilidad de explotar el acceso oportunista al espectro para sistemas de comunicación de corto alcance (secundarios) en el interior de un ambiente urbano denso, donde existe cobertura exterior de un servicio primario de comunicación. Las condiciones de reutilización espacial del espectro se basan en el nivel de interferencia que pueden tolerar los receptores primarios, debido a los transmisores secundarios.

Este capítulo está organizado de la siguiente manera: La sección 3.2 describe el tipo de escenario de estudio, sus principales aspectos y generalidades. En la sección 3.3 se presenta el modelo del sistema y las consideraciones que se toman para la reutilización del espectro. Luego, en la sección 3.4, se muestran los modelos de propagación utilizados y sus características. Posteriormente, en la sección 3.5, se discuten los límites de interferencia tanto para co-canal como para canal adyacente y en la sección 3.6, se presenta la relación de interferencia entre los transmisores secundarios.

3.2 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

En este estudio, se considera un escenario urbano con alta densidad de edificios, ver Figura 3.1, donde podría existir un alto número de

sistemas de comunicación inalámbricos de corto alcance y por lo tanto, una gran cantidad de dispositivos usando el espectro radioeléctrico.



Figura 3.1 Escenario Manhattan

Este análisis está basado en un escenario tipo Manhattan, comúnmente utilizado para describir los trayectos de radio-propagación en escenarios urbanos complejos [81].

En este escenario, se considera la existencia simultánea de sistemas de comunicación inalámbricos primarios y secundarios. Se asume que el sistema primario tiene una cobertura en exteriores, a través de una torre con antenas repetidoras de televisión UHF que transmite hacia antenas pasivas receptoras de TV colocadas en cada uno de los

techos de los edificios. El sistema secundario, en cambio, es considerado para comunicaciones inalámbricas de corto alcance en el interior de los edificios (e.g., redes WLAN residenciales).

3.3 CONDICIONES DE USO DEL ESPECTRO

Las condiciones que determinan la posibilidad de reutilizar el espectro están ligadas a niveles de potencia recibida en los receptores primarios, y a niveles de interferencia causada en estos receptores desde los transmisores secundarios. Esto permite a los usuarios secundarios reutilizar la banda de frecuencia primaria sin causar interferencia.

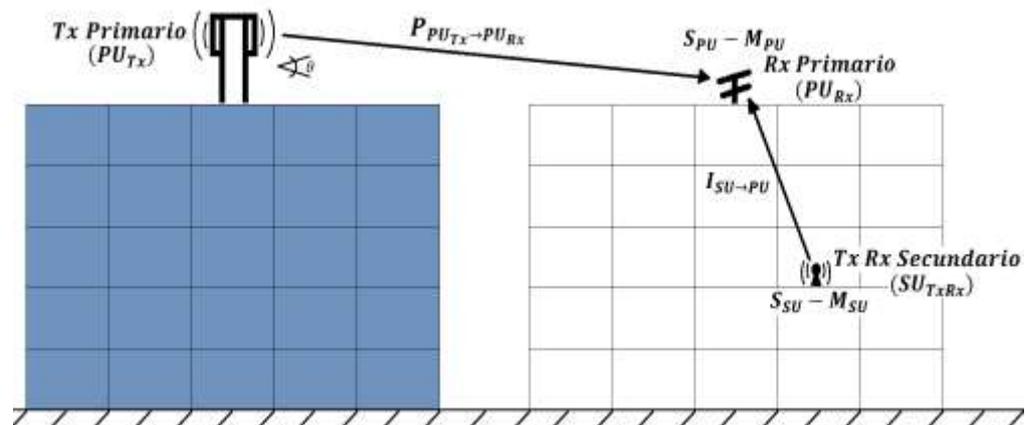


Figura 3.2 Caracterización de la interferencia para el reuso del espectro

Por lo tanto, como se muestra en la Figura 3.2, un receptor primario entiende que un canal específico está en uso cuando la potencia recibida desde la antena transmisora primaria $P_{PU_{Tx} \rightarrow PU_{Rx}}$ es mayor que su sensibilidad S_{PU} menos un margen M_{PU} de protección. Es decir, cuando se cumple que:

$$P_{PU_{Tx} \rightarrow PU_{Rx}} \geq S_{PU} - M_{PU} \quad (3.1)$$

Aunque la ecuación (3.1) detecta la presencia de un canal usado en el escenario, un SU aún tiene la posibilidad de usar dicho canal sólo cuando la interferencia recibida por dicho receptor PU $I_{SU \rightarrow PU}$ sea menor que su sensibilidad S_{PU} menos el margen M_{PU} de protección. Esta condición que restringe a los SU, puede ser formulada matemáticamente como sigue:

$$I_{SU \rightarrow PU} \leq S_{PU} - M_{PU} \quad (3.2)$$

Caracterización del Sistema Primario

Se consideró un sistema punto-multipunto unidireccional, en donde se tiene una torre con antenas repetidoras de TV UHF en una de las

azoteas de los edificios, y antenas pasivas receptoras de TV en las demás azoteas.

Las antenas de la torre se consideran direccionales, y en todo momento existe línea de vista entre éstas antenas y las antenas receptoras de TV. La potencia de transmisión se dimensiona de acuerdo a la cobertura del escenario establecido y considerando una propagación en espacio libre, tal como se detalla a continuación:

$$P_{Tx} = S_{Rx} + L_{(Tx-Rx)} - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (3.3)$$

donde S_{Rx} es la sensibilidad de las antenas receptoras de Tv, $L_{(Tx-Rx)}$ es la pérdida de propagación entre las antenas de la torre repetidora y las antenas receptoras de Tv, y G_{Tx} y G_{Rx} son las ganancias de dichas antenas respectivamente.

Caracterización del Sistema Secundario

En el sistema secundario, se consideran dispositivos de radiocomunicación de corto alcance operando en el interior de edificios (e.g. redes WLAN residenciales). El tipo de antenas utilizadas

en este medio es la omnidireccional, y se asume que estos dispositivos transmiten siempre a su máxima potencia en la banda ISM, por lo que no se realiza un cálculo de potencia de transmisión para canales de esta banda, sino que se consideran los parámetros de transmisión de un dispositivo comercial.

De forma similar, cuando los dispositivos secundarios operan en la banda UHF lo hacen siempre transmitiendo a una máxima potencia establecida con el fin de igualar la cobertura típica que tienen estos dispositivos actualmente cuando operan en banda ISM.

Cálculo de Canal Primario Disponible

El cálculo de canales disponibles se realiza mediante el cumplimiento de dos condiciones básicas ya establecidas en la sección 3.3. Un SU posee disponibilidad de acceso a la banda primaria según las siguientes condiciones:

C1: Condición que busca mostrar si un canal en particular no es recibido por las antenas de TV receptoras:

$$P_{P_{U_{Tx}} \rightarrow P_{U_{Rx}}} \triangleq P_{P_{U_{Tx}}} - L_p + G_{P_{U_{Tx}}} + G_{P_{U_{Rx}}} \leq S_{P_U} - M_{P_U} \quad (3.4)$$

donde $P_{P_{U_{Tx}}}$ es la potencia de la antena repetidora de TV, L_p es la pérdida de propagación, $G_{P_{U_{Tx}}}$ y $G_{P_{U_{Rx}}}$ son las ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente, S_{P_U} es la sensibilidad de las antenas receptoras de TV, y M_{P_U} es el margen de protección del enlace.

C2: Condición que busca determinar si no existe interferencia de los SU a los PU:

$$I_{S_{U \rightarrow P_U}} \triangleq P_{S_U} - L_p + G_{S_{U_{Tx}}} + G_{P_{U_{Rx}}} \leq S_{P_U} - M_{P_U} \quad (3.5)$$

donde P_{S_U} es la potencia emitida por el SU, L_p es la pérdida de propagación, $G_{S_{U_{Tx}}}$ y $G_{P_{U_{Rx}}}$ son las ganancias del dispositivo transmisor secundario y de la antena receptora primaria respectivamente, S_{P_U} es la sensibilidad de las antenas receptoras de TV, y M_{P_U} es el margen de protección del enlace.

La primera condición se prueba en todas las antenas receptoras de TV, mientras que la segunda se lo hace en todos los SUs del escenario. Si al analizar un canal de enlace entre un SU y un PU_{Rx} se cumple la primera condición, entonces el SU tiene disponible dicho canal. Si por el contrario, al realizar el mismo análisis, se obtiene que C1 no se cumple, entonces se procede a comprobar C2, en donde, si C2 se cumple, entonces el canal está disponible para ese SU en particular, en caso contrario no está disponible.

En notación matemática, cada SU está representado como AP_i , y cada antena receptora de TV como RTV_j , y la disponibilidad de reuso del espectro para un canal dado, según C1 y C2, sería:

$$Disp. Canal_{AP_i \rightarrow RTV_j} = C1 \vee C2 \quad (3.6)$$

3.4 MODELOS DE PROPAGACIÓN

La Figura 3.3 muestra los diferentes casos de propagación de señales que se consideran en el escenario para el cálculo de interferencia y potencia recibida.

3.4.1 MODELO DE PROPAGACIÓN EN EXTERIORES

Utilizando el modelo descrito en [82], se calcula la pérdida de propagación entre la antena PU_{Tx} y PU_{Rx} , la cual es igual a la pérdida en espacio libre [25] para señales UHF:

$$L_{Outside} = 32.4 + 20 \log f_{MHz} + 20 \log d_{km} \quad (3.7)$$

donde d_{km} es la distancia entre el transmisor y el receptor (en kilómetros), y f_{MHz} es la frecuencia del canal evaluado en Mega Hertz. Este modelo es usado para obtener $L_{(Tx-Rx)}$ en (3.3).

3.4.2 MODELO DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES

Para modelar la pérdida de propagación entre un transmisor y un receptor situados en el interior de los edificios, se utilizó el modelo descrito en [82] y mostrado a continuación:

$$L_{Indoor} = L_0 + L_C + \sum_{i=1}^W L_{wi} n_{wi} + L_f n_f \left(\frac{(n_f+2)}{(n_f+1)} \right)^{-b} \quad (3.8)$$

donde L_0 es la pérdida en espacio libre para línea directa entre el transmisor y el receptor, n_{wi} es el número de paredes cruzadas de tipo i , W es el número de tipos de pared, L_{wi} es la pérdida de penetración para una pared de tipo i , n_f es el número de pisos cruzados por el enlace, b y L_C son valores constantes empíricos de 0.46 y 0 respectivamente, y L_f es la pérdida por piso. Nótese que la pérdida por piso no es constante, sino que decrece mientras se incrementa el número de pisos.

Este modelo se utiliza para calcular la pérdida de propagación L_p definida en (3.5). Cabe recalcar que este modelo es usado tanto para verificar la disponibilidad $SU \rightarrow PU$, como para evaluar la posible interferencia que se provoquen los SUs entre sí (tanto en banda ISM como en la UHF).

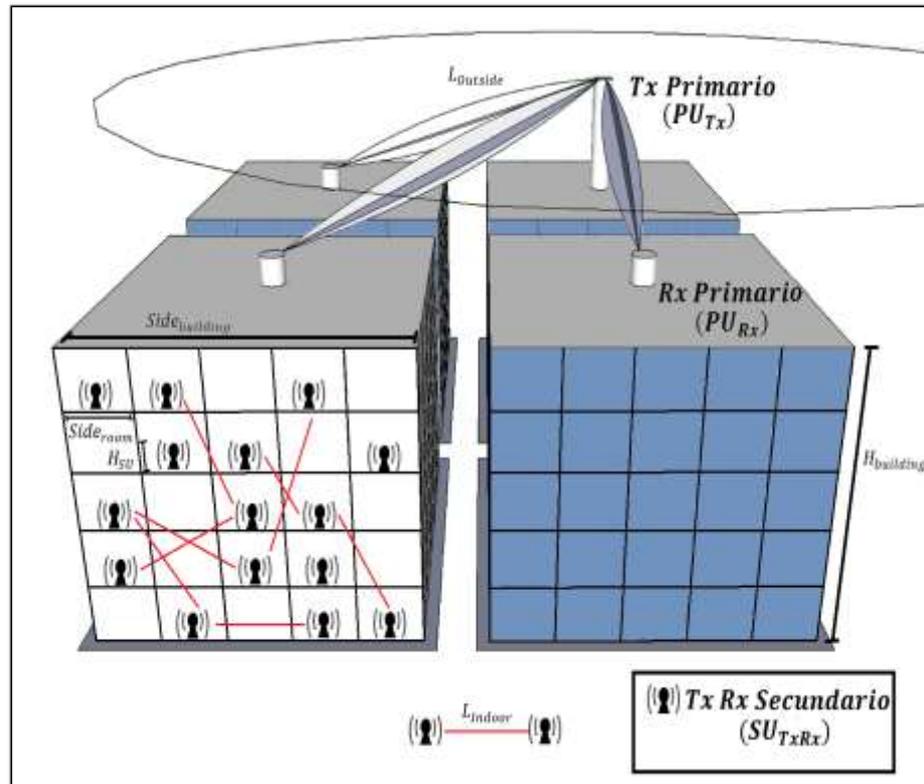


Figura 3.3 Localización de sistemas y uso de modelos de propagación

3.5 SOLAPE FRECUENCIAL

Los conjuntos de canales que podrían ser usados por cualquier AP están dado por C_{ISM} y C_{PB} 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 C_{ISM} hasta $C_{ISM} + C_{PB}$. La canalización, las características de la máscara de transmisión, y los parámetros de transmisión y recepción para la operación en ambas bandas se definió

según las especificaciones del estándar 802.11 descrito en el capítulo 2.

El uso del espectro de los usuarios primarios es diferente al de los usuarios secundarios, puesto que la máscara de transmisión en UHF es diferente a la máscara de Wi-fi. Con la finalidad de transmitir correctamente las señales de los usuarios secundarios que utilizan OSA, el canal utilizado por un AP en banda primaria, está formado no por uno, sino por un conjunto de canales primarios para igualar la máscara del estándar 802.11. En el escenario propuesto, existirá un solo usuario primario que estará transmitiendo un subconjunto aleatorio de canales UHF del total existente en el escenario, mientras que los canales en los APs se asignarán según el mecanismo de asignación de canal presentado en el capítulo siguiente.

El modelamiento de la interferencia entre sistema primario y sistema secundario, así como entre dos vecinos secundarios, se realiza mediante la Recomendación ITU-R SM.337-6 [83], la cual depende de la característica espectral del transmisor interferente y de la respuesta de frecuencia del receptor víctima.

Este factor permite cuantificar la interferencia causada por una transmisión centrada en una frecuencia f_j en un receptor centrado en f_i . El solapamiento frecuencial se calcula cuantitativamente como el área de intersección entre la densidad espectral de potencia del transmisor (PSD) $P_T(f)$ y la respuesta de frecuencia paso bajo del receptor $H_R(f)$, como se muestra en la Figura 3.4.

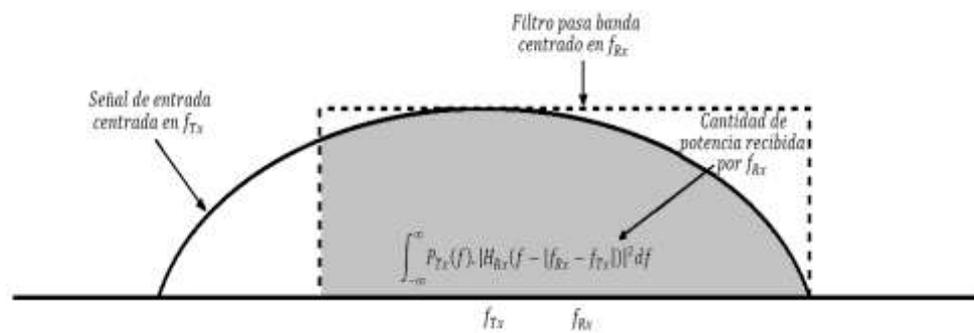


Figura 3.4 Solape Frecuencial [83]

La potencia normalizada recibida en la salida del filtro receptor se denomina factor de interferencia por solapamiento ρ , y puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{I^i \rightarrow R^j} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_1(f) \cdot |H_R(f - |f_j - f_i|)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_1(f) df} \quad (3.9)$$

donde i y j son los índices correspondientes a la frecuencia de los canales usados por el dispositivo interferente I y por el receptor R respectivamente. Este factor puede ser usado para cualquier señal de banda limitada sin considerar su modulación, además se lo puede utilizar entre dispositivos de igual o distinta tecnología inalámbrica. Para el presente trabajo, el cálculo del factor de interferencia por solape se establece para dos casos diferentes:

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

$$\rho_{SU^i \rightarrow PU^j} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{SU}(f) \cdot |H_{PU}(f - |f_j - f_i|)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{SU}(f) df} \quad (3.10)$$

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

$$\rho_{SU^i \rightarrow SU^j} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{SU^i}(f) \cdot |H_{SU^j}(f - |f_j - f_i|)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{SU^i}(f) df} \quad (3.11)$$

3.6 RELACIÓN DE INTERFERENCIA

Interferencia de SU a PU

La interferencia causada por un transmisor secundario sobre un PU, $I_{SU \rightarrow PU}$ y planteada en (3.5) como una de las condiciones necesarias para la existencia de disponibilidad de banda primaria, está establecida para una interferencia co-canal. Sin embargo, se conoce de (3.10) que también un canal adyacente puede interferir en el enlace primario.

Es por esto que la ecuación (3.5) debió ser reescrita para considerar el solape de los canales adyacentes, tal como se muestra a continuación:

$$I_{SU \rightarrow PU} \triangleq P_{SU} - L_p + G_{SU_{Tx}} + G_{PU_{Rx}} - \Delta_{SU^i \rightarrow PU^j} \leq S_{PU} - M_{PU} \quad (3.12)$$

donde $\Delta_{SU^i \rightarrow PU^j}$ es el factor de interferencia de canal adyacente expresado en dB, de modo que $\Delta_{SU^i \rightarrow PU^j} = -10 \log \rho_{SU^i \rightarrow PU^j}$, $\forall \rho_{SU^i \rightarrow PU^j} > 0$.

Interferencia de SU a SU

La interferencia entre APs $I_{SU_u^i \rightarrow SU_v^j}$ se produce cuando un par de dispositivos u, v utilizando canales adyacentes i, j están transmitiendo al mismo tiempo. Estos canales pueden ser tanto de la banda ISM como de la banda UHF.

Se considera interferencia cualquier señal recibida que esté sobre el umbral de sensibilidad del dispositivo para dicha banda en particular. Matemáticamente se puede expresar esta relación entre dispositivos como:

$$I_{SU_u^i \rightarrow SU_v^j} \triangleq P_{SU_u^i} - L_p + G_{SU_u} + G_{SU_v} - \Delta_{SU^i \rightarrow SU^j} \leq S_{SU^i} - M_{SU} \quad (3.13)$$

donde $P_{SU_u^i}$ es la potencia emitida por el SU, L_p es la pérdida de propagación, G_{SU_u} y G_{SU_v} son las ganancias de ambos dispositivos secundarios respectivamente, S_{SU^i} es la sensibilidad del dispositivo según la banda de transmisión del canal i , y M_{SU} es el margen de protección del enlace.

De tal manera, la interferencia en un dispositivo ν producida por un dispositivo u puede ser normalizada tal como se muestra en (3.14).

$$NI_{u,\nu}^{i,j} = \frac{I_{SU_u^i \rightarrow SU_\nu^j}}{P_{SU_u^i}} \quad (3.14)$$

CAPÍTULO 4

MECANISMO DE ASIGNACIÓN DE CANAL

En esta sección se formula el problema de la interferencia entre dispositivos WLAN como un problema de falta de organización en la asignación de canales. Se presenta la formulación matemática que sustenta el análisis del escenario, así como la descripción del algoritmo propuesto, el cual, utilizando las métricas y las restricciones presentadas en el capítulo 3, pueda hallar una solución óptima al problema planteado.

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de la asignación de canales para despliegues WLAN con acceso oportunista tiene como objetivo encontrar una adecuada asignación de canal para cada uno de los APs del escenario con la finalidad de requerir la menor cantidad de canales primarios y buscando mantener el nivel de interferencia siempre al mínimo.

Como parámetros de entrada se consideran la disponibilidad del espectro en cada uno de los puntos de acceso y la relación de interferencia entre estos.

Se busca mantener siempre al mínimo el uso de canales de la banda primaria, pues su disponibilidad varía constantemente durante su uso. De igual manera, la disponibilidad de estos canales de banda primaria adicionales son diferentes para cada AP, pues dependen de la ubicación de cada Access Point (se utiliza heterogeneidad del espectro). La Figura 4.1 muestra un esquema del problema planteado.



Figura 4.1 Mecanismo de Asignación de Canal

4.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El escenario de estudio se representa como un grafo $G = (V, E)$, en el cual los vértices $V = \{ap_1, ap_2, \dots, ap_N\}$ corresponden a los N APs

desplegados en el escenario, y los enlaces E corresponden a los niveles de interferencia entre los APs, como se muestra en la Figura 4.2. Nótese que, por ejemplo, el enlace de 1 a 4, no siempre es igual al enlace de 4 a 1, esto se debe a que cuando los dispositivos trabajan en canal adyacente, también existe interferencia entre ellos. Sin embargo esta interferencia no es la misma en ambos lados debido principalmente a que las frecuencias de operación no son iguales y por lo tanto tienen diferentes características de propagación.

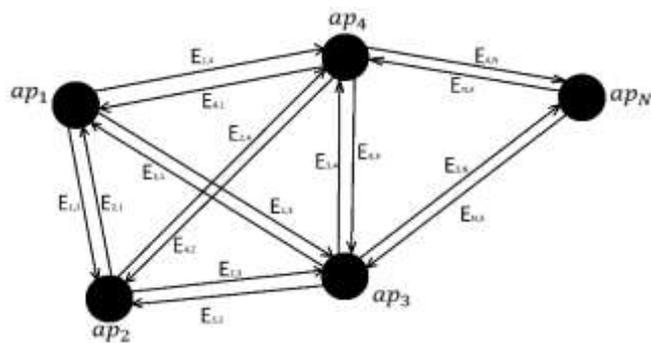


Figura 4.2 Representación del Escenario en Grafo

En particular, existe un enlace $E_{u,v}$ entre dos APs, si la potencia recibida en el ap_u desde el ap_v , dada por $(Pr_{ap_v \rightarrow ap_u})$, es mayor que la sensibilidad S_{ap_u} del ap_u , es decir cuando se cumple que $Pr_{ap_v \rightarrow ap_u} > S_{ap_u}$, por lo que la interferencia estaría dada como

$I_{u,v} = Pr_{ap_v \rightarrow ap_u}$ dicha interferencia normalizada viene dada por

$NI_{u,v} = \frac{I_{u,v}}{Pt_v}$. Esto es válido tanto para transmisiones en co-canal como

en canal adyacente. La interferencia total producida en un ap_u por

los otros $N - 1$ APs está dada por:

$$SNI_u = \sum_{v=1}^{N-1} NI_{u,v} \quad (4.1)$$

Adicionalmente, de (4.1) se puede inferir que la interferencia total en todo el escenario, definida como la sumatoria de la interferencia recibida en cada AP, estaría dada por:

$$TNI = \sum_{u=1}^N SNI_u \quad (4.2)$$

Para una correcta comprensión de la presente sección es necesario definir y mencionar que el canal asignado a un ap_u por el algoritmo está representado como $Ch(ap_u)$, donde $Ch(ap_u) \in (C_{ISM} \cup C_{PB})$.

4.3 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO

Para resolver el problema de asignación de canales en WLAN con disponibilidad OSA se propone un algoritmo basado en conocidas técnicas heurísticas de asignación de recursos, tales como la mecánica de selección natural y la genética natural [14].

Con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados en la Figura 4.1, se propone un algoritmo genético el cual evolucionará con el tiempo a medida que transcurren generaciones (e.g. iteraciones).

Dicho algoritmo consta de una población de Np individuos

$Pob_x = \{Ind_1, Ind_2, \dots, Ind_y, \dots, Ind_{Np}\}$, como se muestra en la Figura 4.3,

los cuales representan distintas soluciones al problema y son evaluados mediante una función de utilidad, conocida como fitness,

representada en la ecuación (4.2), el algoritmo tiene como objetivo

minimizar el valor de dicha función. Los individuos están formados por

los canales asignados a cada uno de los N access points del

escenario $Ind_y = \{Ch(ap_1), Ch(ap_2), \dots, Ch(ap_u), \dots, Ch(ap_N)\}$.

$$Population = \left\{ \begin{array}{cccccc|c} Ch(ap_1)_1 & Ch(ap_2)_1 & \cdots & Ch(ap_u)_1 & \cdots & Ch(ap_N)_1 & TNI_1 \\ Ch(ap_1)_2 & Ch(ap_2)_2 & \cdots & Ch(ap_u)_2 & \cdots & Ch(ap_N)_2 & TNI_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Ch(ap_1)_y & Ch(ap_2)_y & \cdots & Ch(ap_u)_y & \cdots & Ch(ap_N)_y & TNI_y \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Ch(ap_1)_{N_p} & Ch(ap_2)_{N_p} & \cdots & Ch(ap_u)_{N_p} & \cdots & Ch(ap_N)_{N_p} & TNI_{NP} \end{array} \right\}$$

Figura 4.3 Estructura de la Población

En cada generación se crea un nuevo conjunto de individuos como resultado de la reproducción sexual o asexual de los individuos anteriores, logrando que sus características se mezclen y generen un individuo con un menor valor de función utilidad, lo que conlleva a una menor interferencia del escenario.

El algoritmo es ejecutado por una entidad central que permite su control y operación, tal como se muestra en la Figura 4.4; de manera que se pueda asignar un canal de operación a cada AP, ya sea de la banda ISM o de la banda primaria. Se asume que los APs tienen comunicación permanente con la entidad central, la forma cómo lo hacen está fuera del alcance de este estudio.

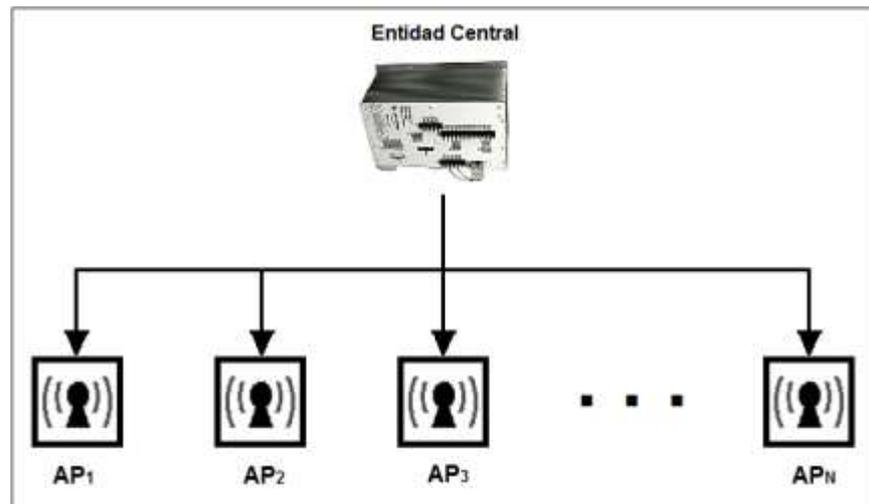


Figura 4.4 Entidad Central

Además, el algoritmo necesita de diversas variables de control para su funcionamiento, las cuales son datos de entrada y definen su comportamiento. En particular, en este algoritmo se definen las siguientes variables de entrada:

- El número máximo de generaciones G_{\max} que evaluará el algoritmo.
- La cantidad de individuos Np que conforman una población.
- El conjunto de canales ISM (C_{ISM}) y UHF (C_{UHF}).
- La variable n representa el tamaño del conjunto *elit*, el cual está formado por los mejores individuos de una población, esto se conoce como elitismo.

- La probabilidad de cruce P_c y la probabilidad de mutación P_m que poseen los individuos genéticos.

El uso de estas variables en la ejecución del algoritmo dará como resultado una población en la cual se habrá minimizado el valor de la función de utilidad referida en (4.2).

El pseudocódigo usado para desarrollar el algoritmo se muestra en la Figura 4.5 y trabaja de la siguiente manera:

El algoritmo empieza creando la población Pob_G que está formada por Np individuos que representan diversas soluciones al problema propuesto, cada individuo está formado por los N canales asignados $Ch(ap_u)$ a cada uno de los APs. Inicialmente todos los APs de la población tienen asignado un canal de operación de la banda ISM $Ch(ap_u) \in C_{ISM}$ (línea: 1).

Función: Algoritmo Genético	
Datos: Generación máxima (G_{max}), Tamaño de la población (Np), Cantidad de APs (N), Canales ISM (C_{ISM}), Canales UHF (C_{UHF}), Elitismo (n), Probabilidad de cruce (p_c), Probabilidad de mutación (p_m)	
Resultado: Individuos con menor TNI	
1.	Crear la población Pob_G de tamaño Np asignando de forma aleatoria un canal ISM (C_{ISM}) a cada AP
2.	WHILE $G \leq G_{max}$; Verificar que se cumpla el criterio de parada
3.	$TNI = \sum_{u=1}^N SNI_u$; Cálculo de la función de utilidad de cada individuo
4.	IF $elit \neq \emptyset$
5.	$elit \rightarrow Pob_{G+1}$; Añadir n mejores soluciones a la siguiente generación
6.	FIN (4)
7.	WHILE $size(Pob_{G+1}) < size(Pob_G)$
8.	Seleccionar padres: $F_G = \{Ind_{y1_G}, Ind_{y2_G}\}$; Selección por torneo determinístico + aleatorio
9.	IF $random[0,1] < p_c$
10.	Cruzar padres: $Ind_{y1_G} \Leftrightarrow Ind_{y2_G}$; Cruce uniforme
11.	$Ind_{y1_{G+1}} = Ind_{y1_G} \wedge Ind_{y2_{G+1}} = Ind_{y2_G}$
12.	IF $random[0,1] < p_m$
13.	Mutar Hijo ; Llamar función
14.	END (12)
15.	$\{Ind_{y1_{G+1}}, Ind_{y2_{G+1}}\} \rightarrow Pob_{G+1}$
16.	ELSE
17.	$\{Ind_{y1_G}, Ind_{y2_G}\} \rightarrow Pob_{G+1}$
18.	END (9)
19.	END (7)
20.	$Pob_{G+1} \rightarrow Pob_G$
21.	$G = G + 1$; Aumentar contador de generaciones
22.	END (2)

Figura 4.5 Pseudocódigo del Algoritmo Genético

Como el algoritmo se ejecuta iterativamente, un criterio de parada se establece con el fin de detener el algoritmo. En particular, este algoritmo tiene un criterio de parada, el cual es evaluado después de analizar todos los individuos y detiene el algoritmo cuando el número de generaciones G llegue al máximo G_{\max} (línea: 2).

Mientras no se cumpla el criterio de parada el algoritmo realiza una serie de acciones, se procede a calcular el valor de la función de utilidad de cada individuo, el cual representa la interferencia total generada entre APs (línea: 3). Para empezar a formar la nueva población se considera un escenario elitista, en el cual se mantienen los mejores individuos en la siguiente generación para permitir la mejora continua del algoritmo (línea: 4-6).

Para el paso de una generación a la siguiente se aplican una serie de operadores genéticos hasta que la siguiente generación se complete (línea: 7-19) [14]. Los más empleados son los operadores de selección, cruce, copia y mutación. El operador de selección será el encargado de escoger que individuos van a disponer de oportunidades de reproducirse, se ha de otorgar un mayor número de oportunidades de reproducción a los individuos que tengan un menor valor de

interferencia total del escenario. En particular, este algoritmo usa el método de selección por torneo determinístico para obtener el primer padre (e.g. individuo que ha sido seleccionado para participar en el cruce), el cual selecciona dos individuos aleatoriamente y los hace competir entre sí, quedando como ganador el que tenga un menor nivel de interferencia total como primer padre; para obtener el segundo padre, se realiza una selección aleatoria de uno de los individuos de la población (línea: 8).

Una vez que se han seleccionado los individuos que serán padres y que transmitirán sus genes a la siguiente generación, es necesario determinar si estos genes pasan por cruce entre ambos padres o por copia simple de individuos. El cruce de los padres depende de la probabilidad P_c , el cual es alto a fin de obtener diversidad en la nueva generación (línea: 9-18). De producirse el cruce, para este algoritmo se ha escogido el método de cruce uniforme, el cual hace uso de una máscara binaria para realizar el cambio de genes entre los padres. Como se muestra en la Figura 4.6 un “1” indica que los padres mantienen sus genes, mientras un “0” indica que deben cambiarlos entre sí (línea: 10).

A continuación, los padres se convierten en hijos (e.g. individuos generados en el cruce) (línea: 11). Una vez que se ha generado la descendencia (e.g. hijos), se debe aplicar el operador de mutación con una probabilidad de ocurrir P_m (línea: 12-14). Para esto se llama a la función “Mutar Hijo” que permitirá el acceso oportunista al espectro, según la disponibilidad de canales que tenga cada AP, la cual será explicada más adelante (línea: 13).

Luego de esto se añaden los descendientes a la siguiente generación (línea: 15). De no existir cruce, los padres son añadidos directamente a la siguiente generación sin cambios (línea: 16-17).

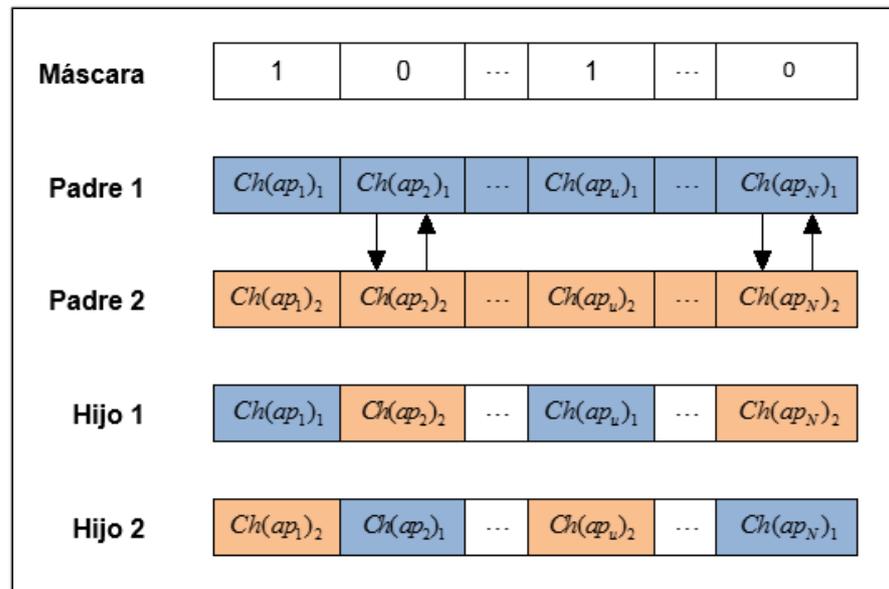


Figura 4.6 Ejemplo del operador de cruce

Una vez que esté completa la siguiente generación, se descarta la población inicial (o población actual) y se establece como nueva población a la siguiente generación (línea: 20), finalmente se aumenta el contador de generaciones (línea: 21). Este proceso se repite hasta que el criterio de parada se cumpla.

En la Figura 4.7, se muestra el pseudocódigo requerido para la implementación de la función “Mutar Hijo”. Esta función es la encargada de mutar los genes de un individuo hijo resultante del cruce entre dos padres. Se empieza seleccionando aleatoriamente dicho hijo, al cual se le mutarán sus genes (línea: 1). La cantidad de genes a mutar viene dada por la variable M , la cual irá aumentando a medida que transcurran las mutaciones (línea: 2). Para esto, se mutará un gen con una probabilidad P_{ISM} (línea: 3), la cual será alta a fin de cumplir con el objetivo de priorizar el uso de la banda ISM (línea: 4), caso contrario la función asignará canales disponibles de la banda primaria a los APs (línea: 6). Luego de esto se aumentará el contador de genes mutados (línea: 8) y se repetirá el ciclo hasta que se complete la cantidad de mutaciones máximas M_{max} .

Función: Mutar Hijo	
Datos: Hijo 1 ($Ind_{y1_{G+1}}$), Hijo 2 ($Ind_{y2_{G+1}}$), Mutaciones máximas (M_{max}),	
Priorización ISM (p_{ISM}), Canales ISM (C_{ISM}), Canales UHF (C_{UHF})	
Resultado: Hijo 1 o Hijo 2 mutado	
1.	Seleccionar $Ind_{y1_{G+1}}$ o $Ind_{y2_{G+1}}$ aleatoriamente
2.	WHILE $M \leq M_{max}$
3.	IF $random[0,1] < p_{ISM}$
4.	$Ch(ap_x) = rand[1,11]$; Asignar un canal C_{ISM} al AP_x
5.	ELSE
6.	$Ch(ap_x) = rand[22,32]$; Asignar un canal C_{UHF} disponible al AP_x
7.	END(3)
8.	$M = M + 1$; Aumentar contador de mutaciones
9.	END(2)

Figura 4.7 Pseudocódigo de la función Mutar Hijo

Convergencia

El mecanismo de convergencia del algoritmo busca que la sumatoria de interferencia en banda ISM en el escenario se establezca de acuerdo a (4.3). Este método propone una salida a la ejecución del algoritmo y consiste en detener su ejecución cuando la interferencia producida en la banda ISM en la siguiente generación no es menor que el 5% de la media de la interferencia en dicha banda en las 50 generaciones anteriores.

$$TNI_{ISM}(\text{generación_actual}) > TNI_{ISM}\left(\frac{0.95 * (50 \text{ generaciones_anteriores})}{50}\right) \quad (4.3)$$

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DEL ALGORITMO

En este capítulo se establecen los parámetros específicos de simulación, se analiza el rendimiento y los resultados del algoritmo genético descrito en el capítulo 4.

5.1 CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO

El escenario de estudio presenta tres tipos de parámetros configurables: infraestructura física, dispositivos, y medio electromagnético. Por la cantidad de dispositivos simulados, y por las características del equipo que evaluará el algoritmo, la infraestructura física está compuesta por un solo edificio del escenario denso tipo Manhattan, el cuál ocupa un área geográfica de 50x50m.

El edificio tiene 5 pisos con una altura de 4m cada uno. Cada piso tiene una distribución interna basada en compartimientos o cuartos de 10x10m. Adicionalmente, los parámetros de configuración de los dispositivos descritos en la sección 3.2 del capítulo 3 se muestran en la Tabla 5.1 [9] [84].

Tabla 5.1 Parámetros configurados

	PU_{Tx}	PU_{Rx}	SU
Potencia de Transmisión (P)	Obtenido por (3.3)	—	15dBm
Sensibilidad (S)	-85dBm	-85dBm	-69dBm
Margen de Protección (M)	10dB	10dB	10dB
Tipo de Antena	Direccional	Omnidireccional	Omnidireccional
Frecuencia de Operación (f)	509 – 629 MHz	509 – 629 MHz	2.4GHz 509 – 629 MHz
Ganancia de Antena (G)	1dBi	1dBi	1dBi
Ángulo de Elevación (θ)	20 grados	360 grados	360 grados

De igual manera, los parámetros de los modelos matemáticos descritos en la sección 3.4 y que representan las características de propagación electromagnética del escenario, son mostrados en la Tabla 5.2 [82] [85] [86] [87].

Tabla 5.2 Parámetros de Modelos de Propagación

Modelo de Propagación en Exteriores	
Parámetro	Valor
Frecuencia (f_c)	509 – 629 MHz
Modelo de Propagación en Interiores	
Parámetro Banda ISM	Valor
Pérdida empírica constante (L_C)	0
Pérdida por pared tipo i (L_{wi})	6.9dB
Pérdida entre pisos (L_f)	18.3dB
Parámetro Banda UHF	Valor
Pérdida empírica constante (L_C)	0
Pérdida por pared tipo i (L_{wi})	3.5dB
Pérdida entre pisos (L_f)	9dB

Es importante mencionar que PU_{Tx} está situado sobre un edificio cualquiera de la configuración tipo Manhattan, mientras que los PU_{Rx} se encuentran uno en cada azotea. La potencia del PU_{Tx} se calcula utilizando la expresión (3.3) con el objetivo de tener una región de cobertura que incluya al techo más alejado respecto al PU_{Tx} , es decir que todos los PU_{Rx} reciben señal del PU_{Tx} , de modo que esta potencia de transmisión es de -16.9dBm. Así mismo, la potencia de transmisión de los SUs cuando usan banda UHF está establecida

según la ecuación (3.8) y buscando tener una cobertura similar a la que tiene la banda ISM en dichos dispositivos, esto es 120m de alcance en línea de vista, lo que establece una potencia de -15.9dBm para transmisión UHF en los SUs. Por simplicidad, se considera que tanto las máscaras de transmisión en banda primaria y como en WLAN son máscaras de forma rectangular. La banda primaria está formada por un grupo de 15 canales UHF.

Nótese que al igual que en la banda ISM, canales UHF contiguos se encuentran parcialmente solapados cuando son usados para transmisión WLAN con máscara de 22MHZ.

El máximo número de canales para WLAN que se pueden usar en banda primaria es 11, tal como se muestra en la Figura 5.1. Estos 11 canales se solapan entre sí. Sin embargo, sólo 3 canales no se solapan, por lo que, considerando ambas bandas de transmisión ISM y UHF, un AP en particular puede tener como máximo 22 canales solapados y 6 sin solape.

Debe notarse que, para usar anchos de banda de 22MHz en la banda primaria, se necesitan 5 canales adyacentes de 6MHz disponibles, por

lo que el primer canal de banda primaria que podría usarse en WLAN estaría formado por los 5 primeros canales UHF.

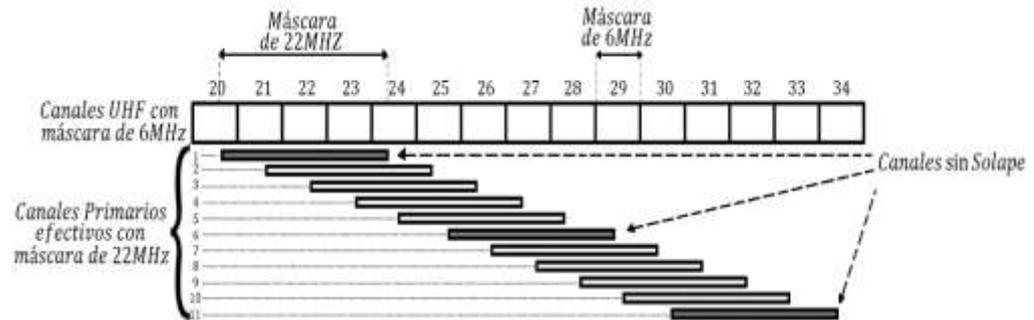


Figura 5.1 Máscara de 22 MHz en BP

5.2 PARÁMETROS DEL ALGORITMO

Con la finalidad de obtener el mejor rendimiento del algoritmo genético, fue necesario parametrizar todas sus variables y así poder determinar los valores más adecuados para su funcionamiento. Este proceso de parametrización se realizó para 50 escenarios con una densidad de dispositivos APs del 80%.

Probabilidad de Mutación

La Figura 5.2 presenta el comportamiento del algoritmo para mejorar los niveles de interferencia en la banda ISM durante el transcurso de generaciones para diferentes valores de probabilidad de mutación (p_m). Si bien, los valores típicos que toma esta variable en los

algoritmos genéticos es alrededor del 0.5% y 2.5%, se decidió comprobar el rendimiento del algoritmo para probabilidades mucho mayores, esto es, para valores de 33%, 66% y 99% de probabilidad.

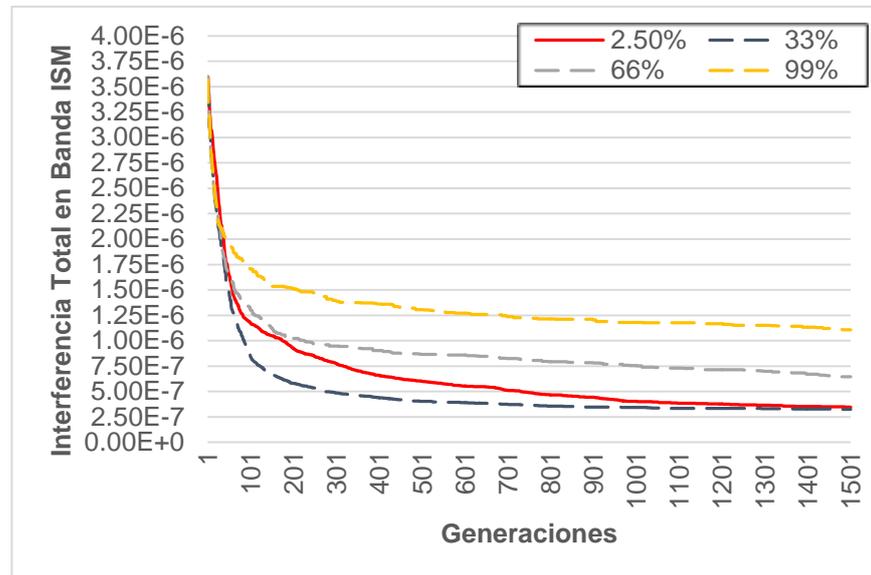


Figura 5.2 Interferencia Total en Banda ISM versus Generaciones, para diferentes valores de Probabilidad de Mutación

Tal como se muestra en la Figura 5.2, una probabilidad de mutación del 33% genera que el algoritmo converja mucho más rápido a valores estables en pocas generaciones, sin embargo, aunque un 2.5% de probabilidad demora un poco más en converger, éste valor permite obtener resultados similares. Por consiguiente, buscando mantener la analogía con el modelo biológico natural mencionado en el capítulo 2,

la probabilidad de mutación será fijada en $p_m = 2.5\%$ para las futuras evaluaciones del algoritmo.

Elitismo

Como se describió en el capítulo 4, es necesario que una cantidad (n) de mejores individuos pasen de una generación a otra, para garantizar que el proceso de búsqueda de la mejor solución nunca de un paso atrás en cuanto a su calidad, por ello se analiza los niveles de interferencia total en banda ISM del escenario para distintos valores de elitismo.

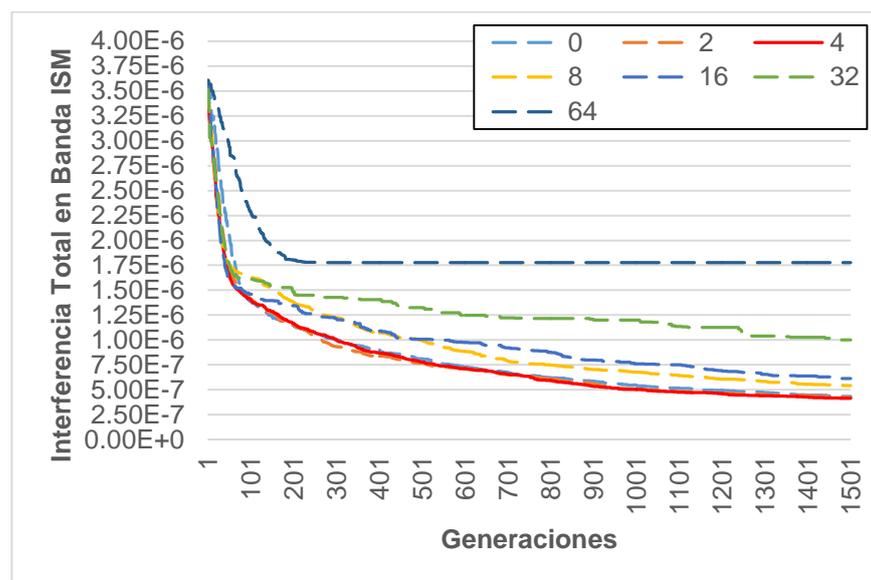


Figura 5.3 Interferencia Total en Banda ISM versus Generaciones, para diferentes valores de Elitismo

Como se aprecia en la Figura 5.3, para valores pequeños de elitismo, el algoritmo genético converge a menores niveles de interferencia en la banda ISM. Es por esto que, con la finalidad de mantener esta virtud, un valor de $n = 4$ se establece para todas las simulaciones.

Tamaño de la Población

Dado que el algoritmo genético basa su funcionamiento en la interacción entre individuos de una población, es necesario establecer la cantidad de individuos (N_p) que la conformarán. Con el objetivo de tener una métrica extrapolable para diferentes densidades de APs en el escenario (e.g. individuos con diferente número de genes), se establece una relación entre la cantidad de individuos de la población y la cantidad de genes de los individuos.

Para esto, la Figura 5.4 muestra el comportamiento del algoritmo para diferentes porcentajes de la relación establecida. Se puede apreciar que mientras crece dicha relación, disminuyen los niveles de interferencia en la banda ISM del escenario. Este comportamiento alcanza su pico cuando existe una relación del 600%, pues para proporciones mayores a esta, no existe mejoría.

Por lo tanto, para las simulaciones de este capítulo, se establece un valor de N_p tal que cumpla con la relación

$$\frac{\text{cantidad_de_individuos_de_poblacion}}{\text{cantidad_de_genes_de_individuo}} \times 100 = 600\% \quad (\text{i.e. individuos}$$

con 10 genes implicará un población con 60 individuos).

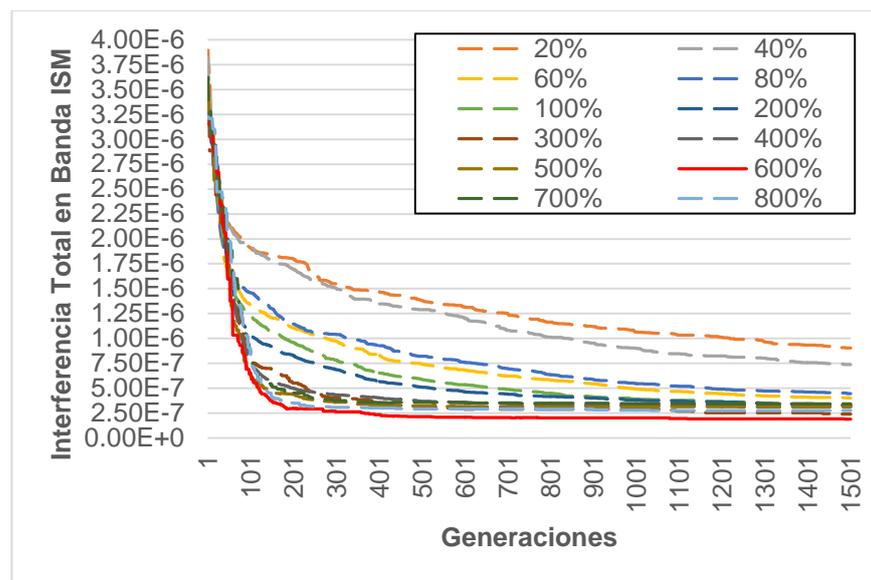


Figura 5.4 Interferencia Total en Banda ISM versus Generaciones, para diferentes tamaños de la población

A continuación, la Tabla 5.3 muestra un resumen de todos los parámetros de configuración del algoritmo propuesto:

Tabla 5.3 Parámetros del Algoritmo

VARIABLE	VALOR
Tamaño de población (N_p)	600% del tamaño del individuo
Elitismo (n)	4 individuos
Algoritmo de selección	Torneo determinístico + aleatorio
Algoritmo de cruce	Uniforme
Probabilidad de Cruce (p_c)	90%
Probabilidad de Mutación (p_m)	2.5%
Priorización ISM (p_{ISM})	90%
Algoritmo mutación	66% del tamaño del individuo
Generaciones	1500

Estos parámetros son utilizados indistintamente para los diferentes escenarios evaluados en este estudio, y fueron determinados tanto por el nivel de optimización que logran en el problema de asignación de canales, como por la velocidad de convergencia y tiempo de ejecución que conlleva la simulación.

5.3 HARDWARE Y SOFTWARE UTILIZADOS

Las simulaciones se las realizaron en entorno MATLAB, específicamente en la versión R2013b (8.2.0.701) 64-bit (win64) de este software, el cual corría sobre el sistema operativo Windows 8.1

de Microsoft Corporation. Las características de hardware, por otro lado, se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Hardware utilizado

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Fabricante	TOSHIBA
Modelo	Satellite P55-A
Procesador	Intel(R) Core(TM) i5-4200U CPU @ 1.60GHz 2.30 GHz
Memoria interna (RAM)	6.00 GB
Tipo de sistema	64-bit Operating System, x64- based processor

5.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se analiza el algoritmo desde dos puntos de vista, primero por su respuesta en el transcurso de generaciones, y posteriormente su resultado para escenarios con diferentes densidades de access points.

5.4.1 ANÁLISIS POR GENERACIONES

Se plantean varios objetivos de evaluación, los cuales son el análisis de la interferencia en las bandas ISM y UHF, el porcentaje de enlaces entre APs presentes en el escenario, el porcentaje de dispositivos que operan en cada una de las bandas y la heterogeneidad del espectro. Estos resultados son

comparados con un algoritmo comúnmente utilizado en este tipo de problemas de asignación de canales como lo es el algoritmo minimax.

Las simulaciones por generaciones han sido obtenidas considerando un escenario donde el 80% de las habitaciones de los edificios contienen APs operando simultáneamente. Esto quiere decir, tal como se describió al comienzo de este capítulo, que se está considerando un escenario con 100 access points distribuidos aleatoriamente.

A fin de contar con respuestas que representen de forma aceptable el comportamiento del algoritmo, cada una de los valores mostrados en las gráficas representa el promedio de 200 escenarios diferentes evaluados en la misma generación.

La Tabla 5.5 muestra el tiempo de ejecución necesario para cumplir el criterio de convergencia definido en la expresión (4.3) del capítulo anterior para diferentes densidades de APs en el escenario y además, el número de generaciones promedio al que converge el algoritmo genético

Tabla 5.5 Generaciones y tiempos de ejecución

Densidad de Dispositivos en el Escenario	Generación a la que converge	Tiempo de Ejecución (segundos)
20%	679	16.4
40%	630	90.2
60%	571	272.6
80%	467	535.8
100%	418	944.4

Donde se observa que para densidades altas de dispositivos en el escenario, el algoritmo genético converge en menos cantidades de generaciones, sin embargo, por la cantidad de dispositivos, el tiempo de ejecución se incrementa.

Con la finalidad de realizar un estudio profundo del algoritmo genético y su respuesta frente al algoritmo minimax, los resultados de este trabajo se analizarán para un número de generaciones mayores (e.g. 1500 generaciones).

Análisis de Interferencia en Banda ISM

La Figura 5.5 muestra un gráfico comparativo del comportamiento del algoritmo genético (rojo) versus el

algoritmo minimax (azul), además presenta claramente la diferencia de ambos algoritmos cuando asignan canales sólo en banda ISM (línea punteada) comparado la gráfica que representa cuando se configuran para acceder de forma oportunista al espectro licenciado (línea continua).

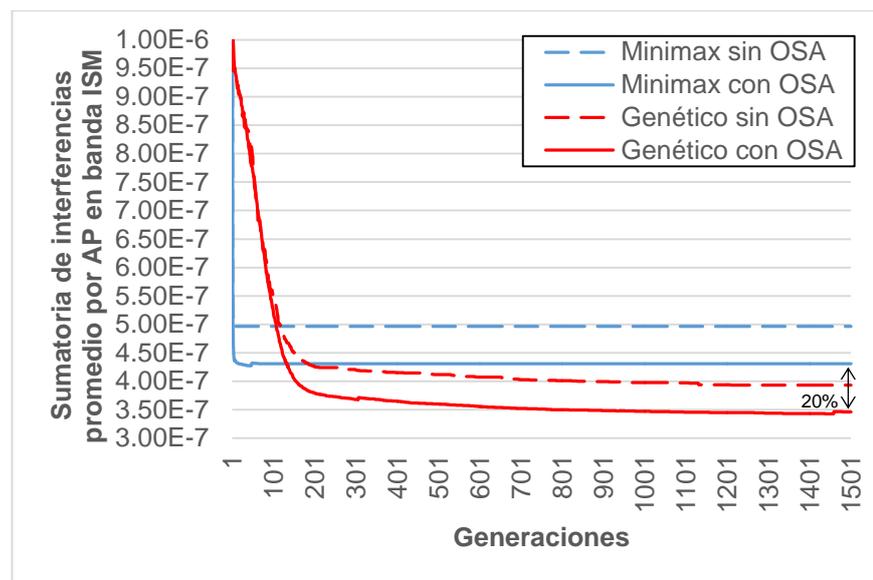


Figura 5.5 Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda ISM versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax, OSA

Este gráfico muestra las virtudes del algoritmo genético, el cual, sin necesidad de utilizar acceso oportunista, llega a tener una sumatoria de interferencias promedio por AP incluso más bajos

que los obtenidos por el algoritmo minimax con posibilidad OSA. Si bien, el minimax converge mucho más rápido que el algoritmo genético, al tener a ambos funcionando con iguales características de disponibilidad de espectro (e.g. ambos con OSA o ambos sin OSA) se puede observar una clara ventaja del algoritmo genético sobre el minimax, puesto que el GA logra alrededor de 20% menos interferencia que los valores finales obtenidos del minimax.

De manera similar, la Figura 5.6 muestra el enlace con mayor interferencia existente en el escenario y cómo éste cambia a lo largo de las generaciones, llegando a menores niveles con el algoritmo genético, pasadas las 520 generaciones, que los que se obtienen con el minimax.

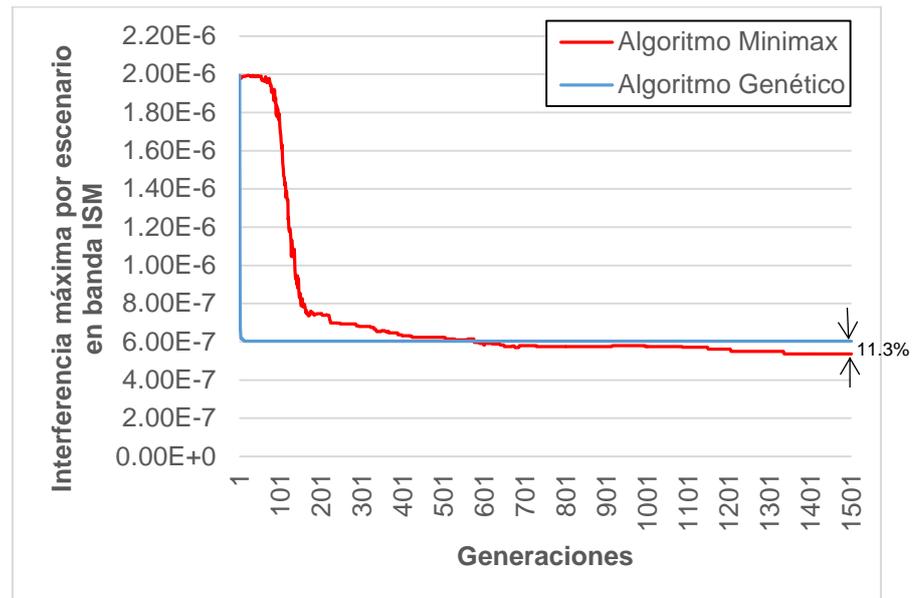


Figura 5.6 Interferencia máxima por escenario en banda ISM versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax

Análisis de Interferencia en Banda UHF

Por otro lado, la Figura 5.7 muestra el comportamiento de ambos algoritmos para la interferencia generada en el escenario en la banda primaria UHF. Donde se observa que, aunque el algoritmo minimax logra una menor interferencia promedio por access points en esta banda, tanto el algoritmo genético como el minimax logran niveles de interferencia menores en estos APs comparados con los niveles de interferencia de los access points que operan en la banda ISM.

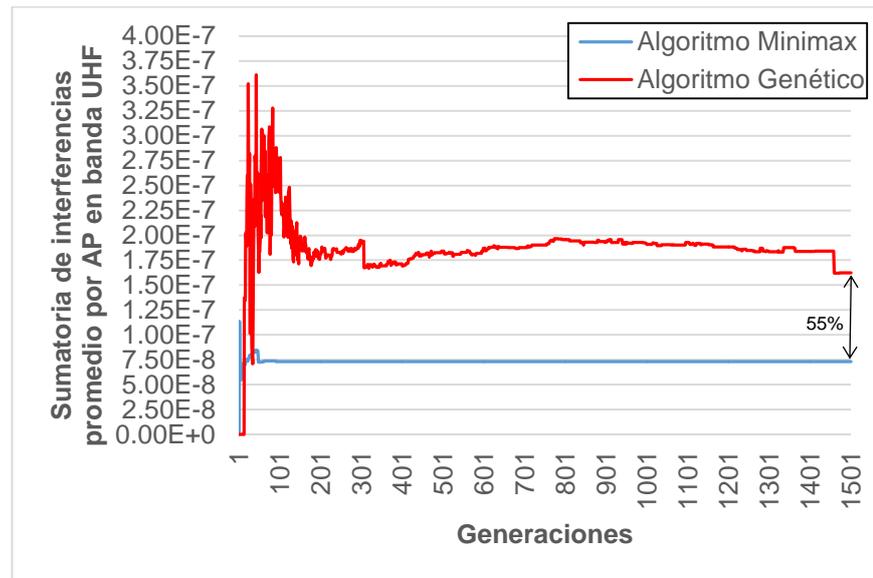


Figura 5.7 Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda UHF versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax

Como se observa en la Figura 5.8, la mayor interferencia en el escenario tiene un comportamiento similar al promedio de interferencia de los APs mientras transcurre el paso de las generaciones.

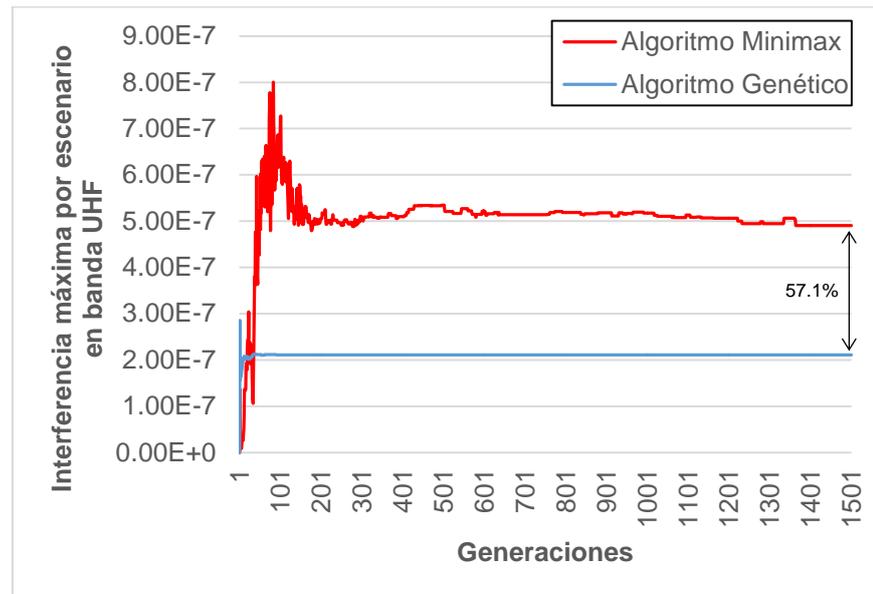


Figura 5.8 Interferencia máxima por escenario en banda UHF versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax

Análisis de Enlaces entre Dispositivos

Nuevamente, la Figura 5.9 muestra la ventaja que tiene el acceso oportunista en la ejecución de los algoritmos de asignación de canal. Además, se presenta el promedio de vecinos que se interfieren en el escenario en el transcurso de la ejecución de los algoritmos genético y minimax. Se puede observar que el algoritmo genético, aunque converge un poco más lento que el minimax, obtiene cerca de 0.8 puntos porcentuales menos de vecinos interfiriendo cada AP que el minimax.

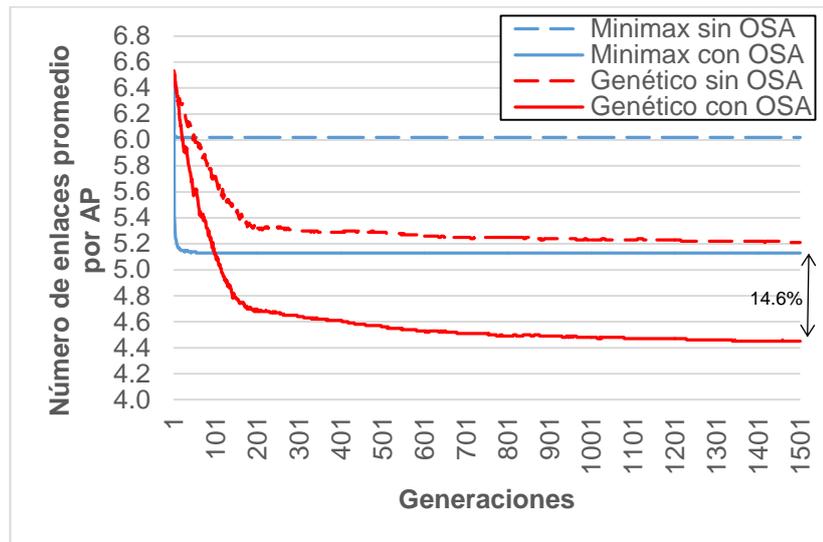
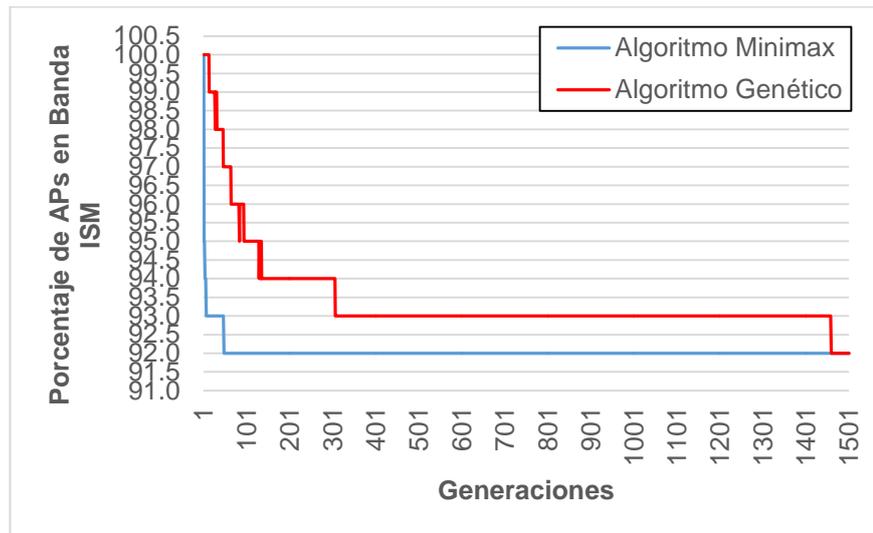


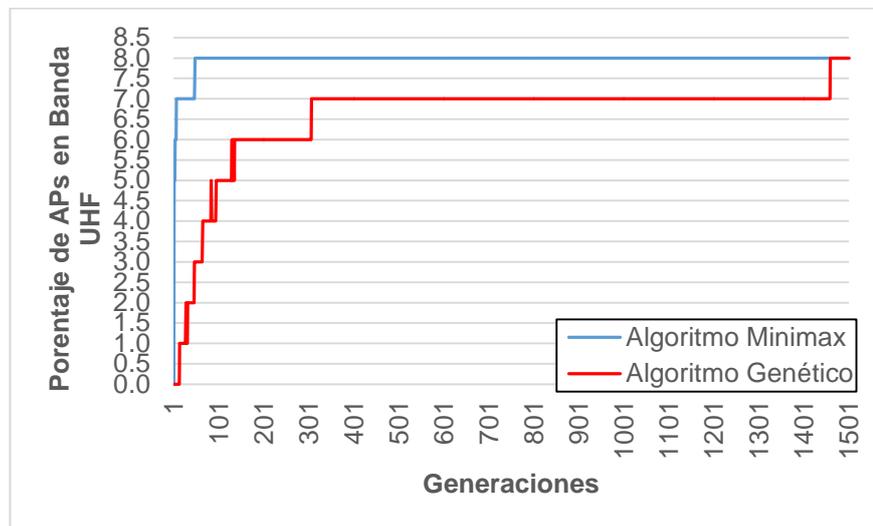
Figura 5.9 Número de enlaces promedio por AP versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax, OSA

Análisis de uso de Bandas

En la Figura 5.10 se puede observar cómo está distribuida la asignación de canales tanto en la banda ISM como en la banda UHF. Estos gráficos muestran a su vez la priorización de la banda ISM, la cual es usada por cerca del 92% de los APs del escenario, mientras la banda licenciada UHF es ocupada sólo por el 8% de los access points que operan en el escenario.



a.



b.

Figura 5.10 Porcentaje de APs operando en banda ISM y UHF versus Generaciones, Algoritmo Genético, Minimax

Análisis de Heterogeneidad de Espectro

Del 8% de access points que operan en banda primaria, la Figura 5.11 muestra su distribución por pisos del edificio. Debido a las restricciones de disponibilidad de espectro consideradas en el capítulo 3, casi no existen APs en banda primaria en los pisos superiores 4 (sólo 1% del total de APs) y 5, sin embargo, este porcentaje crece en los pisos inferiores, pues del 8% de dispositivos usando UHF, el 3% se encuentra en la planta baja, mientras el 4% repartido entre los pisos 2 y 3.

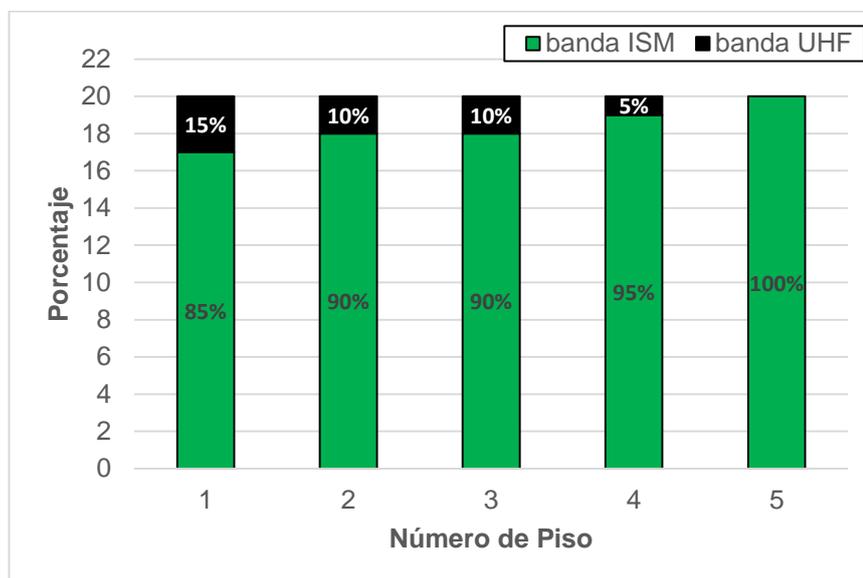


Figura 5.11 Porcentaje de APs operando en banda ISM y UHF por piso del edificio

Una imagen de la distribución de canales en el escenario es mostrada en la Figura 5.12, donde las esferas verdes representan a los APs que utilizan canales ISM, mientras que las esferas negras simbolizan a los access points que operan en banda primaria UHF.

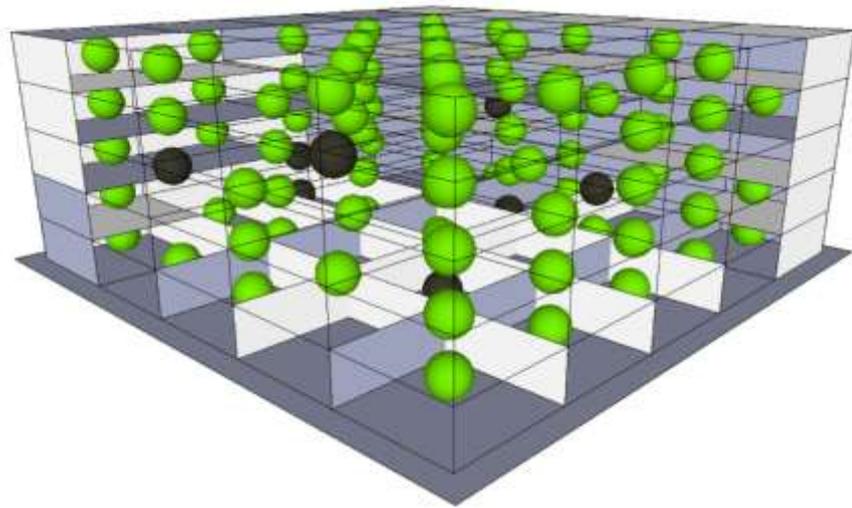


Figura 5.12 Distribución de APs operando en banda ISM y UHF por piso del edificio

5.4.2 RESULTADOS POR ESCENARIOS

A diferencia de la sección anterior, a continuación se muestra un análisis del comportamiento del algoritmo para diferentes cantidades de access points distribuidos en el escenario. Se consideran escenarios con 125 APs como máximo, en los cuales se distribuye cierto porcentaje de dispositivos de manera

aleatoria. Cada punto de la gráfica representa el valor final al cual convergió el algoritmo y equivale a un promedio del valor para 200 escenarios simulados aleatoriamente.

Análisis de Interferencia en Banda ISM

La Figura 5.13 muestra la interferencia promedio percibida en los APs para escenarios con diferentes densidades de dispositivos desplegados. El gráfico muestra claramente como el algoritmo genético logra dos objetivos: mayor reducción de interferencia respecto a la interferencia inicial del escenario, así como también una mayor reducción de interferencia respecto al algoritmo minimax. El algoritmo genético logra mejoras entre el 92.44% y el 62.42% respecto a la interferencia inicial, y mejoras entre el 29.34% y el 18.25% respecto al algoritmo minimax.

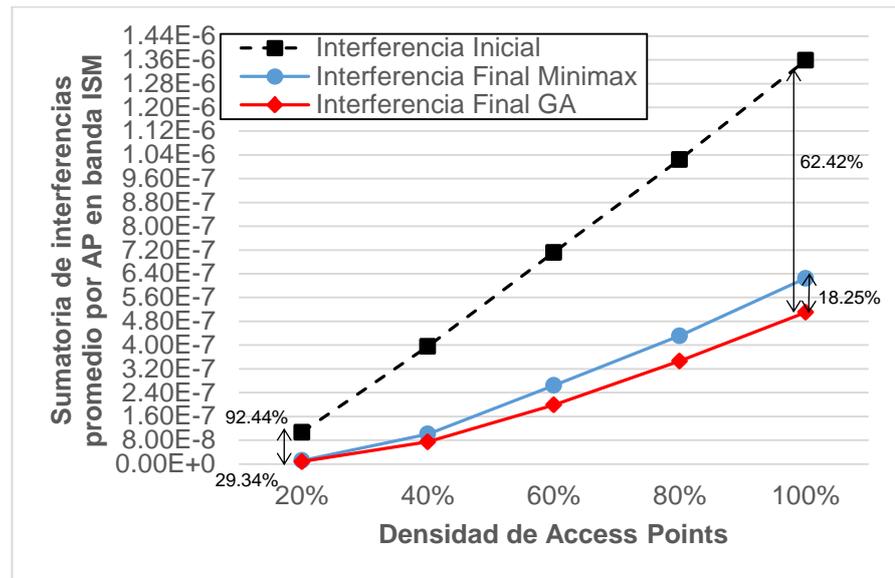


Figura 5.13 Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda ISM versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax

Otro resultado importante que analizar es el presentado en la Figura 5.14 donde se muestra cómo el nivel máximo de interferencia presente en el escenario es disminuido por el algoritmo genético de manera mucho más eficiente para escenarios densos que lo que logra el minimax. Esto quiere decir, por lo visto hasta ahora, que el algoritmo genético logra, tanto la disminución de la media de interferencia como el pico de interferencia en el escenario para escenarios densos.

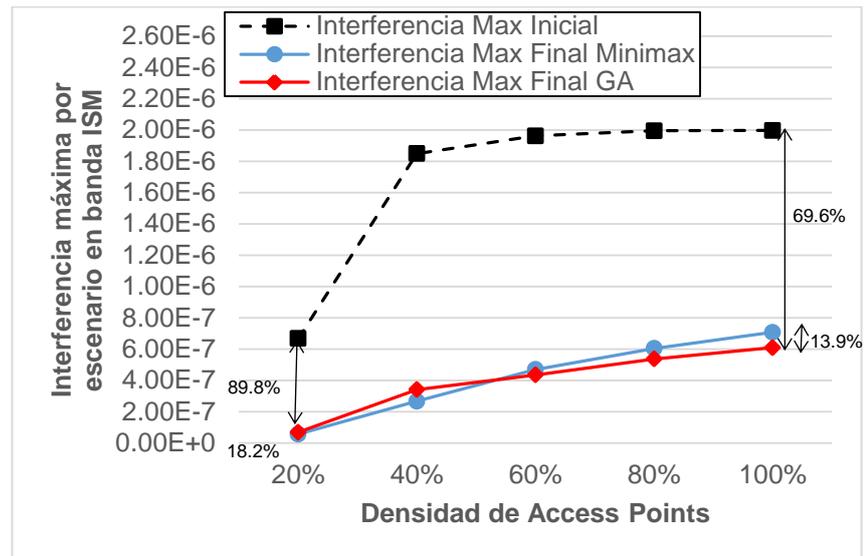


Figura 5.14 Interferencia máxima por escenario en banda ISM versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax

Análisis de Interferencia en Banda UHF

Por otro lado, en la banda UHF, el algoritmo minimax logra niveles de interferencia más bajos que los obtenidos por el algoritmo genético, esto se observa en la Figura 5.15 en el caso de la interferencia promedio por escenario, y en la Figura 5.16 para la interferencia pico del escenario. Pese a incrementarse la interferencia en esta banda, el funcionamiento de los usuarios primarios no es afectado debido a las restricciones establecidas en el capítulo 3, además, ambos algoritmos convergen a niveles de interferencia más bajos en la banda UHF, que los existentes en la banda ISM.

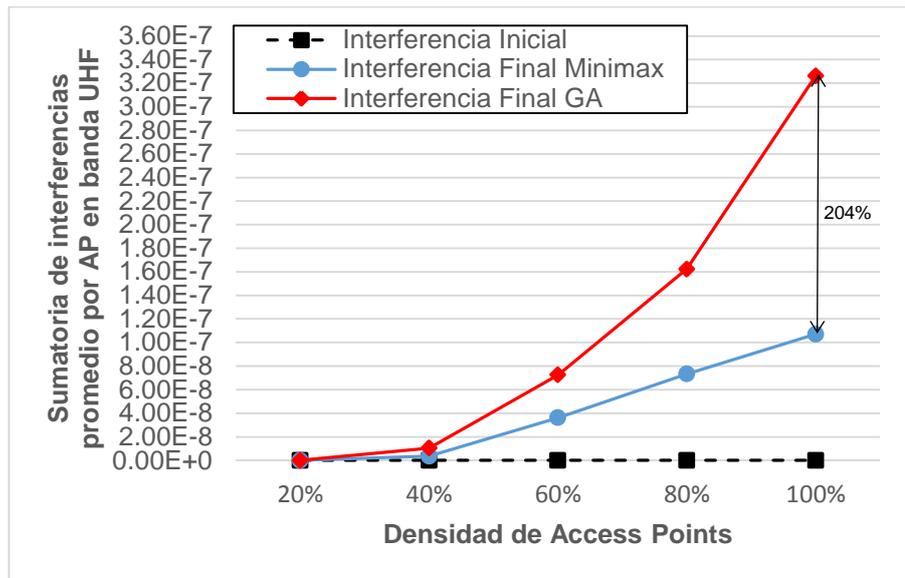


Figura 5.15 Sumatoria de interferencias promedio por AP en banda UHF versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax

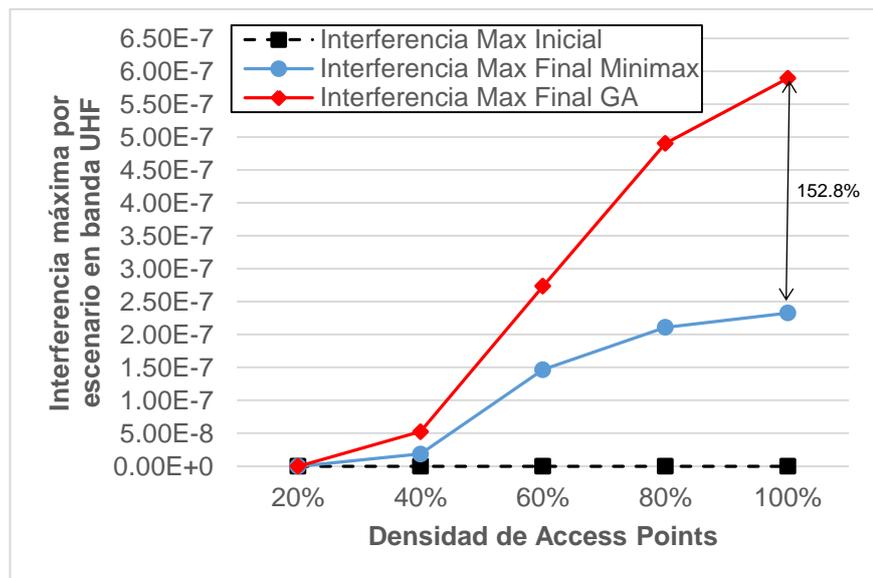


Figura 5.16 Interferencia máxima por escenario en banda UHF versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax

Análisis de Enlaces entre Dispositivos

Tal como se comentó en la sección 5.4.1, el algoritmo genético logra un menor número de APs interfiriéndose entre sí. La Figura 5.17 presenta el comportamiento para el algoritmo en escenarios con diferentes densidades de dispositivos desplegados. Si bien ambos algoritmos mejoran considerablemente la media de enlaces entre dispositivos del escenario, el algoritmo genético logra mejoras entre el 72% y el 31% respecto a la cantidad inicial de vecinos que posee cada AP, y mejoras entre el 29% y el 14% respecto a los resultados obtenidos con el algoritmo minimax.

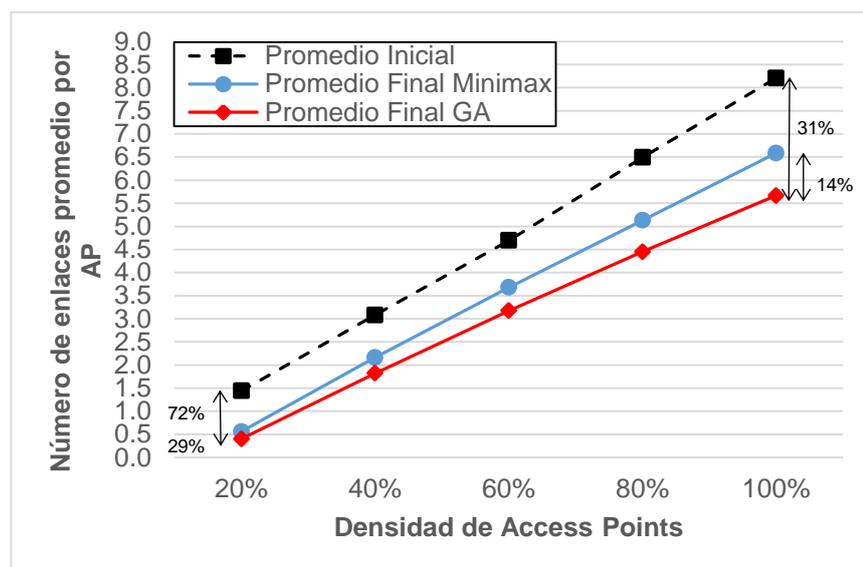
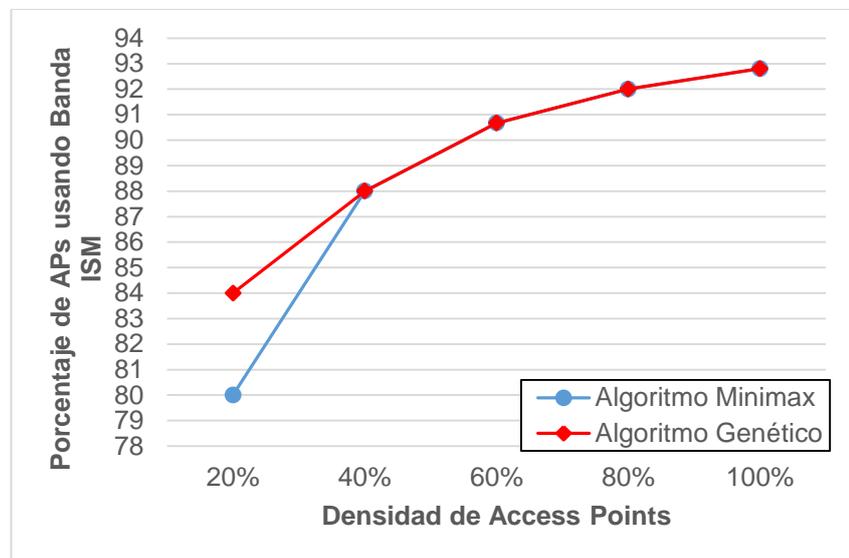


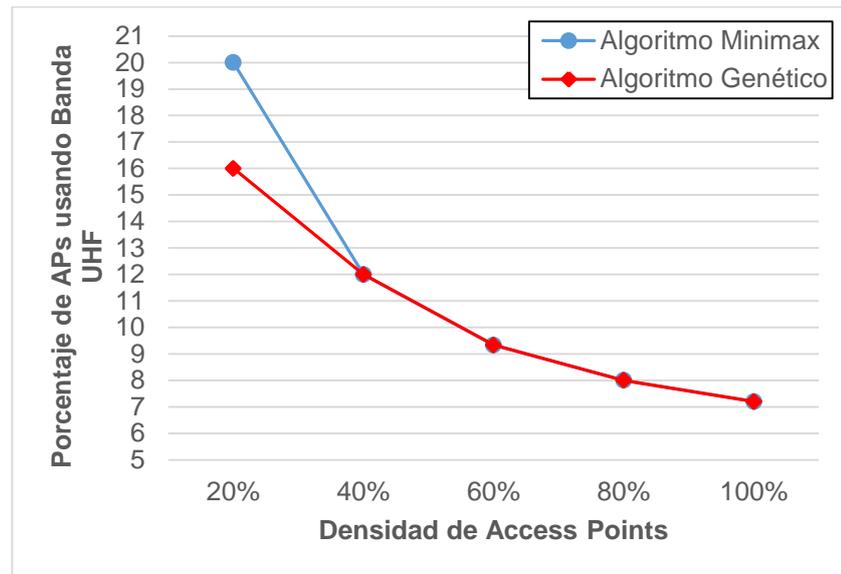
Figura 5.17 Número de enlaces promedio por AP versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax

Análisis de uso de Bandas

Finalmente, la Figura 5.18 muestra el porcentaje de access points que terminan operando en cada una de las bandas luego de ejecutar los algoritmos de asignación de canal. Esta gráfica muestra que pese a las considerables mejoras que presenta el algoritmo genético, éste siempre mantiene la priorización de la banda ISM y en ciertos casos mejora a la asignación del minimax.



a.



b.

Figura 5.18 Porcentaje de APs operando en banda ISM y UHF versus Densidad de APs, Algoritmo Genético, Minimax

CONCLUSIONES

1. Se logró que el algoritmo genético disminuya el valor de la interferencia promedio por AP en la banda ISM mejorando en un 20% al algoritmo minimax, a pesar de que este converge más rápido. Además, con el GA se obtuvo un mayor nivel de interferencia promedio por AP en la banda UHF, sin embargo dicha interferencia no afecta a los usuarios primarios ya que el análisis previo de disponibilidad espacial lo garantiza.
2. Debido a que se consideró un escenario con disponibilidad espacial y heterogeneidad del espectro, se pudo observar que para pisos altos, cercanos a la terraza, casi no existe disponibilidad de banda primaria como en los pisos inferiores, es decir que a medida que vayamos bajando de planta la oportunidad de explotar la banda primaria se incrementa.

3. El algoritmo genético mejora al minimax sin la necesidad de explotar la banda primaria, es decir que realiza una mejor distribución de los canales en la banda ISM.
4. El análisis de la cantidad de dispositivos que operan tanto en la banda ISM como en la banda UHF ayudó a determinar que el algoritmo genético y el minimax logran el mismo porcentaje de APs usando cada una de las bandas para diferentes densidades de APs desplegados en el escenario. Sin embargo, se observó que el algoritmo genético disminuye la cantidad total de enlaces en ambas bandas con el pasar de las generaciones.
5. El porcentaje de dispositivos operando en la banda ISM aumenta a medida que la densidad de APs es mayor, por lo que se mantiene el criterio de priorización de canal pese a que se incrementa el número de dispositivos.
6. Este algoritmo tiene una muy alta complejidad computacional, lo cual se refleja en los tiempos de ejecución del algoritmo, que pueden ser muy altos. Sin embargo, este algoritmo es capaz de lograr mejores resultados para escenarios con un alto número de puntos de acceso.

RECOMENDACIONES

1. El escenario analizado presenta un edificio de 5 pisos, un mejor análisis podría realizarse considerando más edificios, entre los cuales existen calles que son consideradas como espacio libre para los modelos de propagación, donde se tomaría en cuenta las pérdidas por penetración a los edificios así como las de reflexión y refracción de la onda transmitida.
2. Se debe considerar en el estudio un escenario donde constantemente se esté analizando la disponibilidad espacial de su entorno, es decir que se contemple los cambios inesperados de los usuarios primarios. Esto es muy importante ya que la base de datos de la entidad centralizada estará en constante cambio y esto deberá ser informado a cada uno de los APs del escenario.

3. Una variación a la forma de manejar la evolución entre generaciones en el algoritmo genético puede ser contemplada. En particular, para este trabajo se consideró un método de selección combinado (torneo determinístico + aleatorio) y un cruce uniforme, se pueden analizar los resultados usando otros métodos de selección como se presentó en el capítulo 2, incluso incluir mecanismos más avanzados como son los conceptos de poblaciones paralelas y migración de individuos.

4. Pueden considerarse diferentes métricas para la función de evaluación que está implementada en el algoritmo genético. Particularmente, está enfocado en minimizar la interferencia total del escenario. Sin embargo, existen otras métricas que pueden ser analizadas y agregadas a la función de evaluación otorgándoles cierto peso porcentual dependiendo de la importancia de tal característica.

BIBLIOGRAFIA

[1] Horrigan, J., Wireless Access, Pew and American Life Project, <http://www.pewinternet.org/2007/02/25/wireless-internet-access/>, consultado agosto 2014

[2] Novillo, F., Ferrus, R., Agusti, R., Nasreddine, J., Opportunistic Channel Allocation Algorithms for WLANs Base don IEEE802.11, Future Network & MobileSummit 2010 Conference Proceedings, 2010

[3] Bejarano, Y., Han, S., Li, L., Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Association Control, en Proc. ACM Mobicom, 2004

[4] Akella, A., Judd, G., Seshan, S., Steenkiste, P., Self-Management in Chaotic Wireless Deployments, in Proc. ACM Mobicom, 2005

[5] Alawieh, B., Zhang, Y., Assi, C., Mouftah, H., Improving Spatial Reuse in Multihop Wireless Networks – A Survey, IEEE Commun. Survey Tutorials, 2009

[6] Chieochan, S., Hossain, E., Diamond, J., Channel Assignment Schemes for Infrastructure-Based 802.11 WLANs: A Survey, IEEE Commun. Survey Tutorials, 2010

[7] El-Hajj, W., Alazemi, H., Optimal frequency assignment for IEEE 802.11 wireless networks, Wirel. Commun. Mob. Comput., 2008

[8] Yue, X., Wong, C., Chan, S., A Distributed Channel Assignment Algorithm for Uncoordinated WLANs, IEEE CCNC, 2010

[9] Novillo, F., Galeana, H., Ferrús, R., Agustí, R., Spectrum Availability in Indoor Locations for Opportunistic Spectrum Access in Dense Urban Scenarios, Universitat Politècnica de Catalunya, consultado mayo 2014

[10] Huang, S., Liu, X., Ding, Z., Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks, INFOCOM, 2008

[11] Alemu, T., Spectrum Availability Assessment Tool for TV White Space, Aalto University School of Electrical Engineering, consultado Julio 2014

[12] ECC REPORT 159, Technical and Operational requirements for the possible operation of Cognitive Radio Systems in the 'White Spaces' of the Frequency Band 470-790MHz, Cardiff, enero 2011

[13] Novillo, F., Ferrús, R., Channel Assignment Algorithms for OSA-Enabled WLANs Exploiting Prioritization and Spectrum Heterogeneity, IEICE TRANS. COMMUN., abril 2012

[14] Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., Pazos, A., Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética, Universidade da Coruña, consultado agosto 2014

[15] IEEE Computer Society, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11™-2012, marzo 2012.

[16] Lee, Y., Kim, K., Choi, Y., Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs, Local Computer Networks, 2002. Proceedings. LCN 2002. 27th Annual IEEE Conference, noviembre 2002

[17] Zhao, Q., Sadler, B., A Survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy, IEEE Signal Processing, mayo 2007

[18] Buddhikot, M., Understanding Dynamic Spectrum Access: Models, Taxonomy and Challenges, 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007

[19] Spectrum Policy Task Force, Spectrum Policy Task Force Report, Federal Communications Commission ET Docket 02-135, 2002

[20] Lopez-Benitez, M., Casadevall, F., Umbert, A., Perez-Romero, J., Hachemani, R., Palicot, J., Moy, C., Spectral occupation measurements and blind standard recognition sensor for cognitive radio networks, Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2009 CROWNCOM'09 4th International Conference, junio 2009

[21] Jara, P., Nazar, P., Estándar IEEE 802.11 X de las WLAN, Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional
www.edutecne.utn.edu.ar/monografias/standard_802_11.pdf, 2009

[22] Novillo, F., 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 Politècnica de Catalunya, mayo 2013

[23] Stallings, W., IEEE 802.11: Wireless LANs from a to n, presentada en IT Professional, 2014

[24] Kioskea, Introducción a Wi-Fi (802.11 o WiFi), <https://es.scribd.com/doc/244170662/introduccion-a-wi-fi-802-11-o-wifi-789-k8u3gi-pdf>, agosto 2014

[25] Butler, J., Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo, The WNDW Project, octubre 2013

[26] Cisco Systems, Enterprise Mobility 4.1 Design Guide, Cisco Validated Design |

<http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob41dg/eMob4.1.pdf>, abril 2012.

[27] Perahia, E., Stacey, R., Next Generation Wireless LANs Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n, Cambridge University Press, 2008.

[28] Mitola J., Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio, KTH Royal Inst. of Technol. Stockholm Sweden, 2000

[29] Mitola, J., Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications, Proc. IEEE Int. Workshop Mobile Multimedia Communications, 1999

[30] Akyildiz, I., Lee, W., Vuran, M., Mohanty, S., NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A Survey, Elsevier, 2006

[31] Haykin, S., Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications, IEEE J. Sel. Areas Commun. vol. 23 no. 2 pp. 201–220, febrero 2005

[32] Akyildiz, I., Lee, W., Vuran, M., Mohanty, S., A survey on spectrum management in cognitive radio networks, *Communications Magazine IEEE* vol.46 no.4 pp.40-48, abril 2008

[33] Ghasemi, A., Sousa, E., Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environments, University of Toronto, 2005

[34] Wang, B., Liu, K., Advances in cognitive radio networks: A survey, *Selected Topics in Signal Processing IEEE Journal of* vol.5 no.1 pp.5-23, febrero 2011

[35] Krishnamurthy. S., entre otros, Control Channel Based MACLayer Configuration, Routing and Situation Awareness for Cognitive Radio Networks, *Proc. IEEE MILCOM 2005*, octubre 2005

[36] Zhao, Q., Tong, L., Swami, A., Chen, Y., Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework, *Selected Areas in Communications IEEE Journal on* vol.25 no.3 pp.589-600, abril 2007

[37] Ileri, O., Samardzija, D., Mandayam, N., Demand Responsive Pricing and Competitive Spectrum Allocation via Spectrum Server, Proc. IEEE DySPAN 2005, noviembre 2005

[38] Zheng, H., Cao, L., Device-centric Spectrum Management, Proc. IEEE DySPAN 2005, noviembre 2005

[39] Menon, R., Buehrer, R., Reed, J., Outage Probability Based Comparison of Underlay and Overlay Spectrum Sharing Techniques, Proc. IEEE DySPAN 2005, noviembre 2005

[40] Jondral, F., Software-Defined Radio – Basics and Evolution to Cognitive Radio, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2005:3, abril 2005

[41] Zekavat, S., Li, X., User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation, en: Proc. IEEE DySPAN 2005, noviembre 2005

[42] Nishimori, K., Bottega, E., Yomo, H., Popovski, P., Takatori, Y., Prasad, R., Kubota, S., Spatial availability for cognitive radio system under directional

interference, en Proc. 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'06), septiembre 2006

[43] ETSI TR 102 907 V1.1.1, Technical Report, Reconfigurable Radio Systems (RRS); Use Cases for Operation in White Space Frequency Bands, 2011

[44] Alemu, Bayileyegn, T., Spectrum Availability Assessment Tool for TV White Space Cognitive, Master. dissertation aalto university Espoo Finland, 2012

[45] Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), Report C from CEPT to the European Commission in response to the Mandate on: Technical considerations regarding harmonisation options for the Digital Dividend, A preliminary assessment of the feasibility of fitting new/future applications/services into non-harmonised spectrum of the digital dividend (namely the so-called "white spaces" between allotments), Final Report, junio 2008

[46] Nekovee, M., A Survey of Cognitive Radio Access to TV White Spaces, Hindawi Publishing Corporation - International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010

[47] ECC, Report 159: Technical and Operational Requirements for the Possible Operation of Cognitive Radio Systems in the 'White Spaces' of the Frequency Band 470-790 MHz, septiembre 2010.

[48] FCC-10-174, In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: SECOND MEMORANDUM OPINION AND ORDER, septiembre 2010

[49] ECC draft Report 186, Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach, <http://www.cept.org/files/1051/Tools%20and%20Services/Public%20Consultations/2012/Draft%20ECC%20Report%20186.docx>, septiembre 2014

[50] IEEE, IEEE Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless

LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications;
Amendment: TV White Spaces Operation, IEEE P802.11af/D3.0, enero 2013

[51] IEEE, 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, septiembre 2012

[52] Gomes, A., Alver, H., 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 Analysis and COGEU use-cases, 2009

[53] Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., Sai Shankar, N., IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios, New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005.

[54] Chieochan, S., Hossain, E., Diamond, J., Channel assignment schemes for infrastructure-based 802.11 WLANs: A survey, Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2010

[55] Mishra, A., Shrivastava, V., Agrawal, D., Banerjee, S., Ganguly, S., Distributed Channel Management in Uncoordinated Wireless Environments, en Proc. International Conference on Mobile Computing and Networking, 2006

[56] Yue, X., Wong, C., Chan, S., A Distributed Channel Assignment Algorithm for Uncoordinated WLANs, IEEE CCNC 2010, 2010

[57] Bejerano, Y., Han, S., Li, L., Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Association Control, en Proc. ACM Mobicom, 2004

[58] Akella, A., Judd, G., Seshan, S., Steenkiste, P., Self-Management in Chaotic Wireless Deployments, en Proc. ACM Mobicom, 2005.

[59] Alawieh, B., Zhang, Y., Assi, C., Mouftah, H., Improving Spatial Reuse in Multihop Wireless Networks - A Survey, IEEE Commun Surveys Tutorials, 2009

[60] Vasan, A., Ramjee, R., Woo, T., Echos: Enhanced Capacity 802.11 Hotspots, en Proc. IEEE Infocom, 2005

[61] Hillier, F., Lieberman, G., Introduction to Operations Research, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2001

[62] Bertsimas, D., Tsitsiklis, J., Introduction to Linear Optimization, Massachusetts Institute of Technology - Athena Scientific, 1997

[63] Patel, J., Chinneck, J., Active-Constraint Variable Ordering for Faster Feasibility of Mixed Integer Linear Programs, Mathematical Programming Series A, 2007

[64] Novillo, F., Churchman, M., Ferrus, R., Agusti, R., A channel allocation algorithm for OSA-enabled IEEE 802.11 WLANs, Wireless Communication Systems 2009 - ISWCS 2009 6th International Symposium, septiembre 2009

[65] Chowdhury, K., Akyildiz, I., Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access, Selected Areas in Communications - IEEE Journal, enero 2008

[66] Wang, W., Liu, X., List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks, Vehicular Technology Conference 2005. VTC-2005-Fall IEEE 62nd, septiembre 2005

[67] Peng, C., Zheng, H., Zhao, B., Utilization and Fairness in Spectrum Assignment for Opportunistic Spectrum Access, ACM Mobile Networks and Applications (MONET), Agosto 2006

[68] Diestel, R., Graph Theory, Springer-Verlag, 2005

[69] Mahonen, P., Riihijarvi, J., Petrova, M., Automatic Channel Allocation for Small Wireless Local Area Networks using Graph Colouring Algorithm Approach, en Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, septiembre 2004

[70] Achanta, M., Method and Apparatus for Least Congested Channel Scan for Wireless Access Points, US Patent No. 20060072602, abril 2006

[71] Mishra, A., Banerjee, S., Arbaugh, W., Weighted coloring based channel assignment for WLANs, SIGMOBILE Mob. Comput. Commun, Julio 2005

[72] Novillo, F., Galeana, H., Lainz, A., Ferrus, R., Olmos, J., Performance analysis of transport and radio load balancing strategies for BS assignment in mobile access networks, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium, septiembre 2008

[73] Chen, J., Olafsson, S., Gu, X., Yang, Y., A fast channel allocation scheme using simulated annealing in scalable WLANs, Broadband Communications, Networks and Systems. BROADNETS 2008. 5th International Conference, septiembre 2008

[74] Audhya, G., Sinha, K., Ghosh, S., Sinha, B., A survey on the channel assignment problem in wireless networks Wireless Communications and Mobile Computing, John Wiley & Sons, Ltd., 2010

[75] Chaiyaratana, N., Zalzala, A., Recent Developments in Evolutionary and Genetic Algorithms: Theory and Applications, University of Sheffield UK, consultado Agosto 2014

[76] Vafaie, H., Inam, I., Feature selection methods: genetic algorithms vs. greedy-like search, Proceedings of the International Conference on Fuzzy and Intelligent Control Systems, Louisville, KY, 1994

[77] De Jong, K., Potter, M., Evolving complex structures via cooperative coevolution, Proceedings of the Fourth Annual Conference on Evolutionary Programming, San Diego, CA, 1995

[78] Fogel, D., What is evolutionary computation?, IEEE SPECTRUM, febrero 2000

[79] Darwin, C., The Descent Man, Nuvision Publications, 2007

[80] Holland, J., Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1992

[81] Franceschetti, G., Marano, S., Palmieri, F., Propagation Without Wave Equation Toward an Urban Area Model, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, septiembre 1999

[82] Saunders, S., Aragón, A., Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, consultado enero 2014

[83] RECOMMENDATION ITU-R SM.337-6, Frequency and distance separations, consultado abril 2014

[84] Cisco, Cisco AP 541N Wireless Access Point Parte de la serie Cisco Small Business Pro, consultado marzo 2014

[85] Plets, D., Joseph, W., Verloock, L., Tanghe, E., Martens, L., Evaluation of Indoor Penetration Loss and Floor Loss for a DVB-H Signal at 514 MHz, Ghent University, consultado enero 2014

[86] Costa e Silva, J., Gomes, A., Nogueira, J., Sampaio, M., Determining the Average Penetration Loss: Measurement Procedure and Results, consultado mayo 2014

[87] ITU-R, Recommendation ITU-R P.1238-7, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz