



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

Facultad de Ingeniería

**“MECANISMOS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS RADIO EN REDES DE
SENSORES INALÁMBRICAS CON ACCESO OPORTUNISTA AL ESPECTRO”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

DOCTORADO EN INGENIERÍA

Autor:

CARLOS ENRIQUE VALDIVIESO ARMENDÁRIZ

Dirigido por:

PhD. FRANCISCO NOVILLO PARALES

MENDOZA – ARGENTINA

2020



CARLOS ENRIQUE VALDIVIESO ARMENDÁRIZ

ESTUDIANTE DE PROGRAMA DOCTORAL



PHD. FRANCISCO NOVILLO PARALES

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO:

A Dios por darme la fortaleza para cumplir con esta meta

A mi esposa y familia por su apoyo incondicional

Al doctor Francisco Novillo por su acertada dirección

A los Directivos de la ESPOL y de la FIEC por la beca y el apoyo recibido

A mis compañeros de GICOM por sus acertadas contribuciones:

Jorge Gómez

Manuel Romero

Daniel Dik

Alfredo Núñez

Aristóteles Amat

Eduardo Chancay

A mis compañeros de doctorado por la información y solidaridad compartida:

Sarita Ríos

Washington Medina

Efrén Herrera

Holger Cevallos

Gomer Rubio

Albert Espinal

Carlos Salazar

Tomislav Topic

Resumen

El crecimiento de ciudades modernas demanda un continuo incremento de nuevos servicios como el monitoreo de parámetros ambientales, de energía y de salud entre otros, muchos de los cuales utilizan redes de sensores inalámbricos (WSN) (e.g., monitoreo de Temperatura, control de consumo de energía y nivel de CO₂), especialmente en áreas urbanas de alta densidad poblacional. El aumento descontrolado en el uso de WSN podría congestionar la banda del espectro conocida como de uso industrial, científico y médico (ISM). Paralelo a esto, otros dispositivos inalámbricos masivos como las redes de área local (WLAN), Bluetooth, entre otros, ocupan la misma banda congestionada del espectro. En este escenario, las WSN podrían estar sujetas a niveles incontrolables de interferencia, lo cual podría causar graves limitaciones en su rendimiento, pérdidas de paquetes y retardos de información, entre otros problemas.

Complicando aún más el escenario indicado, la aplicación de nuevos conceptos como el Internet de las Cosas (IoT) y las Ciudades Inteligentes (SC), hacen que se multipliquen los requerimientos de servicios brindados por las WSN. Lo cual haría posible el acceso y uso de grandes volúmenes de información mediante WSN interconectadas a dispositivos basados en IP.

El tráfico global de dispositivos IP, de acuerdo a Cisco Visual Networking Index (VNI) se triplicará entre el 2017 y el 2022. Cifras comparables con el reporte publicado por el grupo de investigación On World, acerca de los mercados de WSN, en el que se indica que en el 2018 se comercializaron 1 billón de dispositivos y que predice que para el 2023 esta cifra aumentará en más del triple a 3.4 billones. Estas estadísticas, ratifican la idea de un futuro cercano con elevado número de dispositivos compartiendo la misma banda. Lo cual podría derivar en situaciones de congestión insostenibles que llevaría a la saturación en la operatividad de la banda.

En las WSN, los mecanismos de asignación de canales son utilizados en la mitigación de interferencias causadas por dispositivos que comparten la banda ISM. Sin embargo, a pesar de las habilidades de múltiples algoritmos de asignación de canales con menor interferencia propuestos por la comunidad científica, ha sido necesario la explotación de espacios espectrales disponibles en otras bandas, los cuales están sin uso o están disponibles sólo en cierto tiempo y espacio. Este nuevo concepto de gestión espectral es conocido como acceso oportunista al espectro (OSA); el cual permite que usuarios secundarios (SU) que operan en bandas sin licencia, utilicen frecuencias usadas por usuarios primarios (PU) que operan en bandas con licencia,

siempre y cuando los PU no sufran perturbaciones.

Con el empleo de las técnicas OSA, surgen las redes de sensores inalámbricos cognitivos (CR-WSN), presentándose como una solución promisoría a los problemas de interferencia causados por la congestión de sistemas. OSA permite un manejo más eficiente del espectro; sin embargo, para grandes cantidades de dispositivos, como se espera existan en zonas urbanas densamente pobladas de futuras ciudades inteligentes, las CR-WSN, también tendrían dificultades en alcanzar una determinada calidad de servicio (QoS). Es por tanto imperativo el desarrollo de nuevos algoritmos que permitan sortear futuros problemas.

Motivo por el cual, en el presente trabajo de tesis se plantea una doble aportación. En la primera, se considera el análisis de este tipo de escenarios futuros, bajo consideraciones de capacidades extremas que evalúen sus límites operativos, insumo fundamental para encontrar los mecanismos apropiados que permitan a las WSN desplegadas bajo estas condiciones, superar restricciones de operación tales como la interferencia. En la segunda aportación, se proponen mecanismos de asignación de recursos radio, basados en métodos heurísticos, que permiten usar individualmente o de manera compartida las bandas primaria y secundaria, permitiendo a todos los dispositivos del escenario alcanzar una determinada calidad de servicio. Con el algoritmo propuesto se obtienen excelentes resultados comparables a los obtenidos mediante un algoritmo óptimo de referencia.

Abstract

Densely populated urban areas are continuously demanding an increase in the number of new services, many of them involving wireless sensor networks (WSN). The dramatic increase in the use of WSN overcrowds the Industrial, Scientific and Medical (ISM) spectrum band. Parallel to this, other massive wireless devices such as local area networks (WLAN), Bluetooth, among others, occupy the same congested spectrum band. This scenario could be subject to uncontrollable levels of interference, leading to severe limitations on WSN performance. On this basis, this paper considers imperative the analysis of these types of future scenarios, under extreme capacities evaluating their operational limits, to find the appropriate mechanisms that will allow WSN to overcome urban interference restrictions. Then, under these considerations, a heuristic channel assignment mechanism with low processing levels is proposed. The heuristic mechanism substantially improves the performance of WSN under strong interferences distributing among the coordinators in the scenario, high channel capacities with a performance close to an optimum solution (developed in this work as a benchmarking solution), but well above those currently obtained by the standard channel allocation method.

Índice

AGRADECIMIENTO:	iii
Resumen	iv
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de Figura	xii
Lista de Tablas	xiv
Lista de Abreviaturas	xv
Capítulo 1.	1
Introducción	1
1.1 Justificación y Alcance del Estudio	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Organización de la Tesis	5
1.4 Contribuciones	8
Capítulo 2.	9
Estado del Arte y Contribuciones empleando Técnicas de Asignación de Canal Tradicionales y con Acceso Oportunista al Espectro	9
2.1 Congestión de las Redes en Escenarios de Alta Densidad	10

2.1.1 Métodos de Control de Tráfico	11
2.1.2 Métodos de Control de Recursos	12
2.2 Técnicas Tradicionales de Asignación de Canal	14
2.2.1 Aspectos Relevantes de las WSN	14
2.2.2 Espectro asignado	18
2.3 Técnicas de Asignación de Canal con Acceso Oportunista al Espectro.....	22
2.3.1 Acceso Dinámico al Espectro.....	23
2.3.3 Estándar para el Uso de Espacios Blancos de TV	28
2.3.4 OSA y Espacios Blancos de TV	28
2.3.5 Mecanismos Cognitivos para Acceder a Espacios Blancos OSA y Espacios Blancos de TV.....	29
2.3.6 Contribuciones de Asignación de Canales con Acceso Oportunista al Espectro	30

Capítulo 3..... 33

Modelamiento del Escenario y Desempeño de las WSN en la Banda ISM..... 33

3.1 Modelamiento del escenario	33
3.1.1 Descripción del Escenario.....	34
3.1.2 Caracterización del Espectro	36
3.2 Métricas de Desempeño	37
3.3 Análisis del Desempeño de las WSN	40
3.3.1 Análisis de las Interferencias de las WSN en base a SINR	40
3.3.2 Análisis de las Interferencias de las WSN en base a Capacidad de Canal	48
3.4 Conclusiones	50

Capítulo 4..... 52

Mecanismos de Asignación de Canales en WSN Usando Banda ISM

.....	52
4.1 Análisis del Comportamiento de las WSN en Bandas ISM Congestionadas	53
4.2 Mecanismos de Asignación de Canales.....	56
4.2.1 Formulación Matemática	56
4.3 Descripción del Mecanismo de Solución Óptimo	57
4.4 Descripción del Mecanismo Heurístico Propuesto	59
4.4.1 Mejor Canal del Algoritmo Heurístico Propuesto	60
4.5 Evaluación del Desempeño de los Mecanismos	61
4.5.1 Configuración de la Simulación.....	61
4.5.2 Parámetros de Configuración	61
4.6 Resultados de la Simulación.....	62
4.6 Conclusiones	67

Capítulo 5..... 68

Mecanismos de Asignación de Canales en WSN con Acceso Oportunista al Espectro

.....	68
5.1 Tema de Discusión: Algunos Desafíos de las WSN en Futuras Ciudades Inteligentes	69
5.2 Mecanismos de Asignación de Canales con OSA	71
5.2.1 Formulación Matemática del Problema.....	71
5.2.2 Descripción del Mecanismo MAX-OSA: (ISM&BP).....	72
5.3 Evaluación del Desempeño	74
5.3.1 Parámetros de Configuración	75
5.4 Análisis de los Resultados	77
5.5 Conclusiones	82

Conclusiones y Recomendaciones 84

Bibliografía 86

Lista de Figuras

Figura 1.1. Estructura de la Tesis	7
Figura 2.1: Arquitectura del dispositivo IEEE 802.15.4 [92]	16
Figura 2.2: Modelo de Topología Tipo Estrella [96]	18
Figura 2.3: Banda WSN de 2.4 GHz [97]	19
Figura 2.4: INTERFERENCIA POTENCIAL ENTRE CANALES CRSN/WSN Y WLAN EN BANDA ISM [98]	21
Figura 2.5: Taxonomía del Acceso Dinámico al Espectro [105]	23
Figura 2.6: Esquema Funcional de Acceso a Espacios Blancos de TV [134].....	30
Figura 3.1 Vista Superior del Escenario.....	34
Figura 3.2. Instantánea de Calle Central del Escenario	35
Figura 3.3. Vista Lateral del Escenario desde Calle Central	36
Figura 3.4 Asignación de Canales para WSN y WIFI [140]	37
Figura 3.5 Interferencia sobre un Coordinador.....	38
Figura 3.6 SINR vs Pares de Sensores para Distancia C→S de 3m, Ancho de Calle de 5m e Interferencia AP Variable.....	43
Figura 3.7. SINR vs Número de pares de Sensores con Plena Interferencia de AP, Ancho de Calle de 5m y Distancia entre Sensores Variable	44

Figura 3.8. SINR vs Número de Pares de Sensores con Plena Interferencia de AP, Distancia entre Sensores de 3m y Ancho de Calle Variable.....	44
Figura 3.9. Seudocódigo de Algoritmo Egoísta.....	45
Figura 3.10. Seudocódigo de Algoritmo Altruista.....	46
Figura 3.11. SINR vs Número de Pares de Sensores con Plena Interferencia de AP, Distancia entre Sensores de 2m y Ancho de Calle de 3m.....	47
Figura 3.12. SINR vs Distancia entre Sensores (para 15 Pares) de 1, 2 y 3m con Plena Interferencia de AP y Ancho de Calle de 5m	47
Figura 3.13. SINR vs Ancho de Calle de 5, 10, 15 y 20m con 15 Pares de Sensores, Plena Interferencia de AP y Distancia entre Sensores de 2m	48
Figura 3.14 Factibilidad sin AP	49
Figura 3.15 Factibilidad con 10 AP	49
Figura 3.16 Factibilidad con 10 sensores y 40 AP.....	50
Figura 4.1 Capacidad de canal Promedio vs Número de Pares de Sensores para Diferentes Niveles de Interferencia	54
Figura 4.2 Factibilidad vs Número de Pares de Sensores para Diferentes Niveles de Interferencia	55
Figura 4. 3 Seudocódigo para el Mecanismo Óptimo Utilizado como Benchmarking	58
Figura 4. 4: Seudocódigo del Mecanismo Heurístico Propuesto Max	60

Figura 4.5 Capacidad de Canal Promedio para los dos Mecanismos de Asignación de Canal más el Método de Asignación de Canal Estándar y la Referencia REF vs Número de Pares de Sensores .	63
Figura 4.6 Factibilidad para los dos Mecanismos de Asignación de canales con un umbral de CCTH = 250 Kbps	64
Figura 4.7 (a) Factibilidad para los dos Mecanismos de Asignación de Canales con un Umbral de CCTH = 500 Kbps , (b) Factibilidad para los dos Mecanismos de Asignación de Canales con un Umbral de CCTH = 1000 Kbps	65
Figura 4.8 CDF de los dos Mecanismos de Asignación de Canal Propuestos con 80 Pares de Sensores y un Umbral CCTH = 250 Kbps	66
Figura 5.1 Futura Ciudad Inteligente	70
Figura 5.2 Pseudocódigo del Algoritmo Max-OSA.....	73
Figura 5.3 Resultados de factibilidad promedio (300 escenarios) para algoritmo MAX y MAX-OSA	78
Figura 5.4 Resultados de factibilidad promedio (300 escenarios) para algoritmo MAX, MAX-OSA (+3 BP), algoritmo estándar (+3 BP) y asignación aleatoria (+3 BP).	79
Figura 5.5 Resultados de factibilidad promedio (300 escenarios) para diferentes valores de probabilidad de disponibilidad.	80
Figura 5.6 Porcentaje de asignación de canales de banda primaria	81
Figura 5.7 CDF del mecanismo propuesto con 90 pares de sensores y umbral CCth = 250 Kbps	82

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Bandas de Frecuencias y Velocidades de las WSN	15
Tabla 2.2: Frecuencias Centrales para dispositivos de 2.4 GHz	19
Table 3.1: Parámetros Ambientales Dependientes de la Aplicación [141].....	39
Table 3.2: SINR Mínimo para cumplir una velocidad dada en Kbps para las WSN [144]	40
Table 3.3: Parámetros del Escenario	41
Tabla 3.4: Parámetros de Evaluación.....	42
Tabla 5.1 Valores de Factibilidad de la red	75
Tabla 5.2 Factibilidad ($F_{th} = 0.85$; No. Coordinadores = 150)	76
Tabla 5.3 Capacidad de canal ($F_{th} = 0.85$; Número de Coordinadores = 150)	76
Tabla 5.4 Parámetros del mecanismo MAXv2	77

Lista de Abreviaturas

AP	PUNTOS DE ACCESO (ACCESS POINT)
CR	RADIO COGNITIVA (COGNITIVE RADIO)
CR-WSN	REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS DE RADIO COGNITIVA (COGNITIVE RADIO WIRELESS SENSOR NETWORK)
DSA	ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO (DYNAMIC SPECTRUM ACCESS)
ECC	COMITÉ DE COMUNICACIONES EUROPEAS (EUROPEAN COMMUNICATIONS COMITEE)
FCC	COMITÉ FEDERAL DE COMUNICACIONES (FEDERAL COMMUNICATIONS COMITEE)
IoT	INTERNET DE LAS COSAS (INTERNET OF THINGS)
IEEE	INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS)
FFD	DISPOSITIVO DE FUNCIÓN COMPLETA (FULL FUNCTION DEVICE)
IP	PROTOCOLO DE INTERNET (INTERNET PROTOCOL)
ISM BAND	BANDAS DE USO INDUSTRIAL CIENTÍFICO Y MÉDICO (INDUSTRIAL SCIENTIFIC AND MEDICAL BANDS)
MAC	CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MEDIUM ACCESS CONTROL)
OFCOM	OFICINA DE COMUNICACIONES (OFFICE OF COMMUNICATIONS)
OSA	ACCESO OPORTUNÍSTICO AL ESPECTRO (OPPORTUNISTIC SPECTRUM ACCESS)
PAN	RED DE ÁREA PERSONAL (PERSONAL AREA NETWORK)
PU	USUARIO PRIMARIO (PRIMARY USER)
QoS	CALIDAD DE SERVICIO (QUALITY OF SERVICE)
RFD	DISPOSITIVO DE FUNCIÓN REDUCIDA (REDUCED FUNCTION DEVICE)

RFID	IDENTIFICACIÓN POR RADIO FRECUENCIA (RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION)
SA	RECOCIDO SIMULADO (SIMULATED ANNEALING)
SC	CIUDADES INTELIGENTES (SMART CITIES)
SINR	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO MÁS INTERFERENCIA (SIGNAL TO INTERFERENCE PLUS NOISE RATIO)
SU	USUARIO SECUNDARIO (SECONDARY USER)
TDMA	ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE TIEMPO (TIME DIVISION MULTIPLE ACCESS)
TV	TELEVISIÓN (TELEVISION)
TVWS	ESPACIOS BLANCOS DE TV (TV WHITE SPACES)
VNI	ÍDICE DE RED VIRTUAL CISCO (CISCO VISUAL NETWORKING INDEX)
WLAN	REDES INALÁMBRICAS DE ACCESO LOCAL (WIRELESS LAN)
WS	ESPACIOS BLANCOS (WHITE SPACES)
WSN	REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS (WIRELESS SENSOR NETWORKS)

Capítulo 1.

Introducción

1.1 Justificación y Alcance del Estudio

Por estimaciones de las Naciones Unidas del 2015 al 2030 se conoce que la población mundial crecerá en un 32% y que para el 2030 con la particularidad de que más del 60% de los habitantes se concentrarán en las grandes ciudades. Lo cual hace necesario un desarrollo sustentable que preserve la calidad de vida de los habitantes, siendo la concepción de Ciudad Inteligente (SC) la propuesta que se está utilizando para responder a los desafíos de la sobrepoblación [1]. Gracias a la convergencia de las tecnologías de información y telecomunicaciones, el concepto de SC está en vigencia y los gobiernos locales de varias ciudades del mundo lo están usando para mejorar la vida de sus habitantes, incrementando eficiencia y sostenibilidad en los entornos urbanos [2] [3].

Pero el desarrollo de las SC está fuertemente sustentado en el trabajo de sensores que actuando generalmente como parte del Internet de las Cosas (IoT), concepto que permite la interconexión de objetos y cosas al Internet, mejoran servicios y reducen costos operacionales mediante el empleo de automatización [4]. Las mediciones obtenidas mediante los sensores pasan a mecanismos de monitoreo y control, los cuales son capaces de aprender y adaptarse a cambios continuos de circunstancias de trabajo y suministrar resultados satisfactorios que conllevan a la optimización de los recursos disponibles. Marcando una clara diferencia entre una ciudad normal y una SC [5] [6].

Los problemas y necesidades a causa del aumento poblacional en zonas urbanas de alta densidad [7] demandan cada vez más soluciones para optimizar recursos y servicios disponibles, situación en la que intervienen creciente número de despliegues de redes de sensores inalámbricos (e.g., seguridad estructural mediante sensores de vibración, sensores contra incendio, entre muchos otros) [8] [9] [10].

Los sensores están organizados en Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) conformadas por coordinadores con nodos ruteadores y nodos sensores distribuidos en un área geográfica; los

nodos sensores envían sus mediciones a su coordinador más cercano, encargado de conectar los datos obtenidos al Internet [11]. Las WSN son incluidas en las SC para el monitoreo de muchos servicios, tales como recolección de basura, energía, iluminación, temperatura, sistemas de control de tráfico y vehículos autónomos, entre otros [12] [13] [14] [15].

Como puede intuirse las aplicaciones que involucran a las WSN son de creciente adopción [16], lo cual es corroborado en el reporte presentado por: “Wireless Sensors Network Market”, publicado el 2019; que cubre las tendencias y crecimiento del mercado de las WSN, valorado en USD 46.76 billones para el 2019, que alcanzará a USD 123.93 billones para el 2025 con una tasa anual compuesta de crecimiento del 17.655 [17].

Es importante destacar que, gran parte de las WSN para su operación, utilizan la banda ISM sin licencia [18]; sin embargo, su uso no es exclusivo y deberá compartirlo con otros sistemas inalámbricos como las WLAN y Bluetooth, entre otros [19] [20] [21]. Es así como, en zonas urbanas de alta densidad podrían presentarse casos de masivos despliegues descoordinados de WSN, actuando junto a otros despliegues inalámbricos, de gran crecimiento, que congestionarían la banda provocando impredecibles interferencias [22] [23] [24] [25] [26]. Esto conllevaría a innumerables problemas en la comunicación de los dispositivos como latencias, pérdida de paquetes, disminución de la velocidad de transmisión, entre otros [27], [28] [29]; los mismos que imposibilitarían a las WSN el cumplimiento de una determinada calidad de servicio (QoS), entendiéndose por QoS el cumplimiento de un cierto grado de satisfacción por parte del usuario [30]. Además estos dispositivos no podrían manejar adecuadamente grandes volúmenes de información [31], restringiendo el despliegue de nuevos sistemas de acceso inalámbrico [32].

En su esfuerzo por mitigar la interferencia causada sobre las WSN en banda ISM, varios estudios han diseñado métodos y algoritmos basados en diferentes técnicas como: control de potencia, selección de canales, salto de frecuencia, entre otros. De las cuales la selección de canales es una técnica muy usada por la comunidad científica, ya que permite en base a ciertos criterios tratar interferencias en bandas de interés, destacándose trabajos como: en [33], donde se propone un sistema para medir la intensidad de la señal de radio y obtener mediciones en el tiempo de los canales disponibles, con el objetivo de utilizar el menos interferido por los sistemas de comunicación inalámbrica coexistentes. En [34], un método de predicción utilizó el historial de ruido estadístico del canal para predecir su comportamiento futuro y así poder programar el uso de canales libres para la WSN. En [35], fue propuesto un algoritmo de cambio de canal con la ayuda de un sensor incorporado que permite la detección de interferencias, descartando la selección de canales interferidos. Los autores en [36] propusieron un protocolo de enrutamiento multicanal que utiliza información sobre la topología y calidad del enlace para adaptarse a cambios de entorno; el uso de múltiples canales les permitió realizar transmisiones sin interferencias, aumentando el número de caminos disponibles en forma simultánea.

Pero en escenarios con mayores congestiones en la banda ISM, cuando los mecanismos disponibles no sean suficientes, se hace evidente la limitación del espectro o escasez espectral y nuevamente se podrían producir elevadas interferencias que se traducirían en latencias, pérdidas de paquetes, bajas tasas de transmisión entre otros problemas [37]. Ante la escasez de espectro surge la idea de ampliarlo, con el conocimiento de que un gran porcentaje de canales en bandas licenciadas no son usados todo el tiempo [38] [39]. De acuerdo a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), la frecuencia de uso de las bandas desde 0-6GHz varía entre el 15% y el 85% [40]. Lo cual da lugar a disponibilidades de espacios espectrales conocidos como espacios en blanco (WS) con mejores características de propagación, entre los que se encuentran los espacios blancos de TV (TVWS) [41]. Los TVWS son espacios espectrales pertenecientes a las bandas UHF/VHF, que quedan sin uso debido al cambio de la televisión analógica a digital [42] [43]. Estos TVWS, en banda licenciada, podrían ser reutilizados por nuevos dispositivos de baja potencia con la premisa de no interferir los servicios de televisión [44].

Afortunadamente, surgieron nuevos dispositivos de acceso oportunístico al espectro (OSA) de baja potencia, conocidos como WSN de Radio Cognitiva (CR-WSN) que permiten el acceso a bandas con licencia conocidas como Bandas Primarias (PB), a usuarios de bandas sin licencia conocidas como Bandas Secundarias (SB) [45] [46]. La radio cognitiva (CR), constituye un nuevo paradigma de las Telecomunicaciones inalámbricas, que permite tanto a los nodos como a las redes de comunicación cambiar a conveniencia a bandas más altas o más bajas, sus parámetros de transmisión y recepción; ajustándolos al cumplimiento eficiente de su tarea principal sin causar interferencia a los Usuarios Primarios (PU) que poseen licencia de uso en banda primaria [47]. Los CR-WSN serían considerados como Usuarios Secundarios (SU) de la banda primaria [48].

A consecuencia de lo anterior, la comunidad internacional ha realizado múltiples propuestas con dispositivos CR-WSN que hacen uso dinámico del espectro tales como: la [49], en donde se utiliza una técnica de OSA para la selección de canales en banda primaria, manteniendo un esquema que maneja un umbral para separar CR-WSN, entre los de baja prioridad y los de alta prioridad; teniendo la capacidad de restringir a los de baja prioridad, para incentivar la ocurrencia de los de alta prioridad y cumplir con una determinada calidad de servicio. Por la importancia en la obtención de una adecuada asignación de canales en [50] se propone un mecanismo que calcula, la probabilidad de disponibilidad de canales en las CR-WSN, por medio de un proceso marcoviano, que evalúa patrones de uso temporal y espacial, para seleccionar los nuevos canales de operación. Los autores en [51], proponen la asignación de canales mediante CR-WSN, utilizando una técnica meta heurística, que usa un algoritmo modificado de Colonia de Hormigas, cuya solución, se basa en el seguimiento del rastro dejado por las hormigas, en su incesante búsqueda de los mejores caminos para conseguir alimento; en

este caso específico, los caminos son los canales. Con el empleo del acceso dinámico al espectro, nuevas rutas de acceso hacia los canales primarios son posibles, para lo cual, en [52], sus autores han desarrollado un algoritmo, que permite a los CR-WSN seleccionar las rutas menos interferidas y energéticamente eficientes, para reducir retardos desde la fuente al destino.

Todo parece indicar que los escenarios congestionados de futuras ciudades inteligentes son inevitables [53] [54] [55] [56]. Lo cual permitiría que los dispositivos WSN y CR-WSN continúen multiplicándose hasta límites de interferencias intolerables, que se manifestarían en un pobre desempeño de los mismos dentro de su espacio de trabajo sin poder asegurar una determinada QoS [57] [58] [59].

Adicionalmente, así como la banda ISM es finita, el uso de la banda primaria también es finito y podría saturarse por el excesivo acceso oportunístico de dispositivos [60]; además su uso no es exclusivo y podría compartirse con dispositivos cognitivos de otros sistemas inalámbricos (i.e. IEEE 802.22) [61]; lo cual también podría incrementar los niveles de interferencia, a niveles inmanejables impidiendo a las CR-WSN el cumplimiento de una determinada QoS [62].

En consecuencia, en este trabajo, se proponen mecanismos para mitigar las interferencias de las WSN en banda ISM; y, cuando las soluciones antedichas en banda ISM no son suficientes, se proponen mecanismos con dispositivos CR-WSN que hacen uso de técnicas OSA para acceder a nuevos canales de operación disponibles en PB.

Los mecanismos para mitigar interferencias en banda ISM propuestos en este estudio, a diferencia del trabajo previo, que se enfoca principalmente en técnicas de control de energía, prioriza la obtención de una cierta QoS a través de algoritmos de asignación de canales y control de interferencias. Razón por la que en este documento, para mitigar interferencias de las WSN en banda ISM sin OSA, se presentan dos contribuciones: 1) La primera que analiza el rendimiento de la WSN en entornos de alta interferencia, identificando los límites operativos de estos dispositivos trabajando descontroladamente en su banda de operación; y, 2) La segunda contribución que es una propuesta heurística que logra muy buenas características operativas para las WSN, con excelentes resultados que requieren pocos recursos computacionales para mantener una cierta calidad de servicio en las WSN. Como benchmarking, se desarrolló una solución óptima que representa la mejor solución posible, desarrollada a partir de un algoritmo de recocido simulado modificado [63] [64] [65].

Los Mecanismos empleando técnicas OSA también propuestos en este estudio, permiten que los dispositivos CR-WSN en caso necesario, puedan acceder a banda ISM o a bandas primarias, con la finalidad de alcanzar un objetivo de QoS requerido, mediante la utilización de criterios probabilísticos en base a una cierta capacidad de canal umbral. Para lo cual, cada dispositivo

buscará mejores capacidades de canal primero en la banda nativa (i.e., ISM) y luego en banda primaria. En tal forma que maximice el empleo de la banda ISM antes de utilizar la banda primaria y mejore los niveles de capacidad de canal de toda la red.

1.2 Objetivos

Los principales objetivos de esta investigación, se enmarcan en los beneficios que puedan obtenerse de la aplicación de técnicas OSA aplicadas a las WSN en escenarios urbanos de alta densidad de futuras SC y son los siguientes:

- 1) Caracterizar el escenario y el modelo de Sistema que permita el estudio de desempeño de las WSN en sus bandas de operación
- 2) Desarrollar y evaluar mecanismos de asignación de recursos radio para las WSN que permitan a estos dispositivos operar en los canales disponibles en banda ISM, con el fin de mejorar su QoS.
- 3) Desarrollar y evaluar mecanismos de asignación de recursos radio para las WSN que permitan a estos dispositivos operar en los canales disponibles tanto en las bandas autorizadas sin licencia como en las licenciadas habilitadas por OSA, con el fin de mejorar su QoS.

1.3 Organización de la Tesis

La estructura de la tesis está representada en la Figura 1.1, en donde, luego de presentada la introducción se describe cada capítulo, con sus productos y su interacción con los demás.

El Capítulo 2, hace una revisión del Estado del arte de las WSN. Para lo que se tratan los siguientes temas: La congestión de la congestión de las redes en escenarios de alta densidad, las Técnicas tradicionales de asignación de canales y finalmente las Técnicas de asignación de canal con acceso oportunista.

El Capítulo 3 está dedicado al Modelamiento del escenario y desempeño de las WSN en banda ISM. Para lo cual se revisan los siguientes tópicos: Modelamiento de WSN en ambiente de alta densidad, Métricas de desempeño de las WSN y Análisis del desempeño de las WSN.

En el Capítulo 4 se presenta una propuesta de soluciones a problemas de severas interferencias que podrían sufrir las WSN en banda ISM, para lo cual se desarrolla un Mecanismo Óptimo, usado como referencia alcanzable deseada; un Mecanismo Heurístico propuesto que permite alcanzar resultados cercanos al Óptimo; y por último, un Mecanismo Tradicional que sirve como referencia inicial de comparación para observar cuantitativamente

las mejoras alcanzadas por el Heurístico propuesto. Adicionalmente se evalúa el desempeño de los mecanismos presentados.

En el Capítulo 5, se presenta un nuevo mecanismo de asignación de canales con acceso oportunista al espectro, que es utilizado cuando los que usan solamente banda ISM son insuficientes en su desempeño para tratar ambientes con elevada congestión de dispositivos. Presentándose en este caso, el desarrollado un nuevo y mejorado Mecanismo Heurístico en base al anterior como la propuesta para un mejor desempeño de la red. En igual forma se completa, para la nueva realidad de congestionamiento, el comportamiento del Mecanismo Tradicional desarrollado en el capítulo anterior y utilizado como referencia inicial. Para finalmente evaluar el desempeño de los mecanismos tratados.

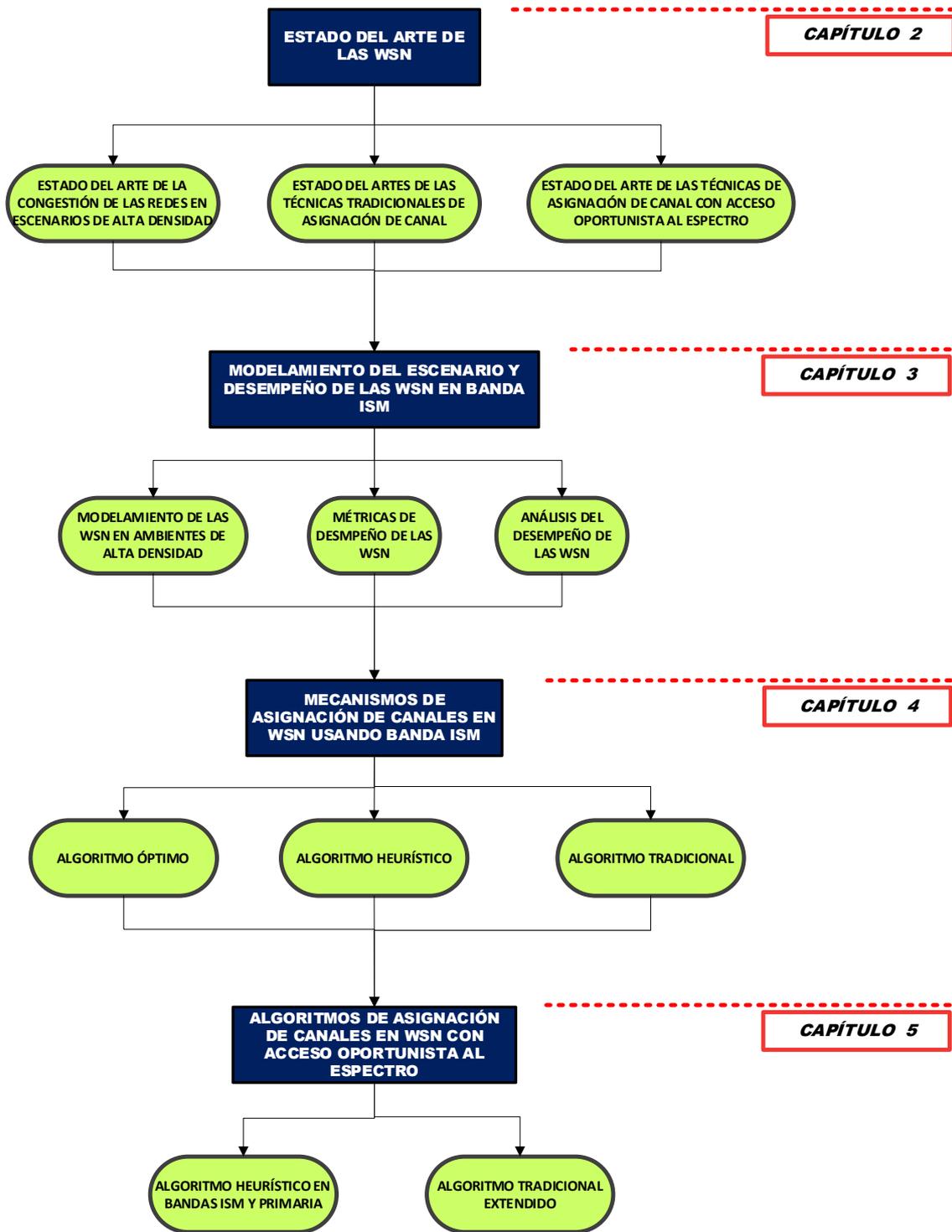


Figura 1.1. Estructura de la Tesis

1.4 Contribuciones

A raíz del presente trabajo de tesis se han ido obteniendo diferentes resultados los cuales han sido publicados en diferentes conferencias y revistas internacionales, con el apoyo del Grupo de Investigaciones Móviles (GICOM) de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

La lista de los trabajos publicados es la siguiente:

- Carlos Valdivieso, Francisco Novillo, Aristóteles Amat, Alfredo Nuñez-Unda, “Heuristic Channel Assignment Mechanism for WSN in Congested ISM Bands Based on QoS,” *International Journal of Electrical and Electronic Engineering, & Telecommunications (IJEETC)*, Polonia, 2020.
- Carlos Valdivieso, Francisco Novillo, Daniel Dik, “Wireless Sensor Networks Scenario Proposal for Evaluating SINR in Dense Urban Areas,” *Ecuador Technical Chapters Meetings (ETCM)*, Salinas-Ecuador, 2017.
- Carlos Valdivieso, Francisco Novillo, Daniel Dik, “Mecanismos Centralizados de Asignación de Canales en WSNs en Entornos Urbanos Densos” *Red Ecuatoriana de Universidades y Escuelas Politécnicas para el Desarrollo de la Investigación y Posgrado (REDU)*, Sangolquí-Ecuador, 2016.
- Carlos Valdivieso, Francisco Novillo, Jorge Gomez, Daniel Dik, “Centralized Channel Assignment Algorithm for WSN Based on Simulated Annealing in Dense Urban Scenarios”, 2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM) Medellin-Colombia, 2016.
- Carlos Valdivieso, Francisco Novillo, Jorge Gomez, Daniel Dik, “Performance Evaluation of Channel Capacity in Wireless Sensor Networks using ISM band in Dense Urban Scenarios”, *IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Guayaquil-Ecuador, 2016.
- F. Novillo, C. Valdivieso and F. Velasquez, "Centralized channel assignment algorithm for OSA-enabled WLANs based on simulated annealing," 2015 7th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM 2015), Arequipa-Peru, 2015, pp. 1-6.

Capítulo 2.

Estado del Arte y Contribuciones empleando Técnicas de Asignación de Canal Tradicionales y con Acceso Oportunista al Espectro

Las WSN constan de tres componentes básicos, nodos sensores, nodos transmisores y nodos coordinadores. Los nodos sensores toman mediciones, los transmisores las transportan hacia los coordinadores. Los cuales tienen la capacidad de conectarse al internet para dirigir los datos hacia un almacenamiento de recolección de información que posteriormente será analizada y distribuida [66] [67].

En los últimos años, múltiples redes de sensores inalámbricas (WSNs) han sido desplegadas principalmente en zonas urbanas de alta densidad. Esto es principalmente debido a sus costos competitivos, a los múltiples servicios que prestan, a su facilidad de instalación y al hecho de que el uso de las frecuencias dentro de la banda en que operan, no requiere de una licencia [68]. Dicha banda no solamente posee un número limitado de canales, sino que su uso es compartido con otros sistemas inalámbricos, con el consecuente aumento de los niveles de congestión en los dispositivos receptores [69].

OSA, por otro lado, es una técnica de acceso dinámico al espectro (DSA). Basada en CR, que permite la apertura del espectro licenciado para que pueda ser usado por SU sin licencia, siempre y cuando se limiten las interferencias percibidas por los PU a niveles que no perturben su operación [70].

La combinación de estas tecnologías en conjunto con el desarrollo de la CR, posibilita el desarrollo actual de los sensores CR-WSN, los cuales dotan a las WSN de capacidades OSA, que permiten una gestión más eficiente del espectro radioeléctrico [71].

En este capítulo, con el objeto de apreciar los problemas de congestión desde sus inicios

hasta la actualidad, se describen: el Estado del Arte de la Congestión de la Redes en Escenarios de Alta Densidad; para luego tratar, el Estado del Arte de las Técnicas Tradicionales de Asignación de Canales; para finalmente, presentar el Estado o del Arte de las Técnicas de Asignación de Canal con Acceso Oportunista al Espectro. Estos temas son de gran utilidad para el desarrollo de los capítulos subsiguientes.

2.1 Congestión de las Redes en Escenarios de Alta Densidad

Las WSN constituidas por nodos, transmiten en forma organizada la información a través de canales inalámbricos. El importante rol alcanzado actualmente por las WSN en el mundo comunicaciones se debe entre otras consideraciones: a su pequeño tamaño, bajo costo, uso de frecuencias libres de pago y grandes funcionalidades como la de monitorear y sensar cambios en su área de influencia. En general, cuando las WSN transmiten de la fuente al destino a través de un canal de comunicación, que podría estar sujeto diferentes grados de congestión [72].

En el inicio de una implementación con las WSN en una determinada área de trabajo, la primera pareja sensor → coordinador colocada, al estar sola, no sufrirá de congestión. A medida que crece la concentración de dispositivos habrá momentos en que de dos dispositivos que quieren utilizar un mismo canal solo uno de ellos lo logre mientras el otro tenga que esperar, esto ya es una indicación de que los efectos de la congestión empiezan a sentirse, manifestándose como latencias o demoras en la transmisión de información [73]. Imaginemos ahora la existencia de un considerable número de dispositivos WSN en la misma área de trabajo mencionada inicialmente, es de suponer que las latencias aumentarán y habrá dispositivos que quieren transmitir y no pueden hacerlo y mientras lo intentan, siguen recibiendo nueva información para transmitir. Habrá un momento en que sus buffers o espacios de almacenamiento ya estarán llenos [74]; al no poder almacenar más paquetes de información y simplemente los pierden, pudiendo causar pérdidas de información; Esta situación de congestión que se continuará agravando con la participación de un mayor número de redes WSN [75].

Los congestionamientos indicados pueden llegar a causar verdaderas molestias a tal punto de tornarse intolerables, especialmente debido a que las WSN no son las únicas en utilizar la banda ISM, es decir que hay una multiplicidad de dispositivos que se disputan su uso. Por estos motivos la congestión de las WSN es un campo de gran interés y continuo desarrollo que va presentando nuevos desafíos ante el enorme crecimiento de dispositivos inalámbricos especialmente en escenarios urbanos de alta densidad, como los que se encontrarían en ciudades inteligentes modernas, las cuales hacen un uso creciente de las aplicaciones con WSN en la

provisión y administración de sus servicios [76].

Siendo la congestión uno de los problemas más importantes de la WSN que necesita una atención adecuada, la comunidad internacional, ha presentado gran cantidad de alternativas para su mitigación entre las que mencionamos dos tipos de métodos, de control de tráfico y de control de recursos; de estos dos métodos el que mayor precisión proporciona es el de control de tráfico por la forma más directa en que se puede ejercer control [77] [78].

2.1.1 Métodos de Control de Tráfico

Los métodos de control de tráfico son utilizados para administrar y reducir el flujo de tráfico en la red, entre los que se presentan:

Esquema Dinámico de Control de Congestión Ágil (DACC) [79] que usa banderas especiales que en forma proactiva empiezan a evitar el congestionamiento desde los nodos sensores en la fuente, alterando su ciclo de trabajo en caso de aumento en la cola de información. Para evitar la congestión el mecanismo DACC empleado, está basado en tres ideas funcionales: 1) Adopta una bandera de alerta de congestión y otra bandera para clasificar los datos como críticos o no críticos. 2) Usa una técnica de marcación en el buffer del coordinador receptor de la información para advertir al nodo sensor sobre la presencia de congestiones incipientes. 3) Utiliza un método de control de tráfico que permite disminuir la repetición de transmisiones entre el sensor y el coordinador alterando el ciclo de trabajo. La implementación de este algoritmo en una plataforma de trabajo especial, pudo probar su operatividad en el mejoramiento de alertas en la detección de información crítica o no y cambios de ciclo de trabajo, minimizando la pérdida de paquetes.

Recopilación de Datos de Control Diferenciada (DRCDC) [80], este mecanismo puede mitigar la congestión reduciendo en forma inteligente lo datos con menor cantidad de información. El DRCDC evita o mitiga la congestión en base a dos esquemas uno espacial y otro temporal, a través de la teoría de la Entropía de la Información, manteniendo baja tasa de distorsión en la información recopilada por la red. 1) En el mecanismo de mitigación de congestión espacial se mantiene una correlación entre los datos de detección ordenados matricialmente, en tal forma que algunos datos faltantes puedan recuperarse de otros adquiridos espacialmente. Así al momento de ocurrencia de congestiones hay manera de recuperar datos de manera inteligente. 2) Con la mitigación de congestión en temporal, se reducen los intervalos de tiempo de recopilación de datos con poca información para reducir la velocidad de flujo que debe transmitirse, evitando congestión y minimizando la distorsión de los datos de la red.

Resultados experimentales del esquema DRCDC, muestran un mejor rendimiento que otros esquemas tradicionales de toma de datos, reduciendo pérdidas de datos y retrasos en la entrega de paquetes.

Control de Congestión y Esquema de Balance Energético Basado en la Jerarquía de WSN [81], este es un tema importante, para el manejo de aplicaciones con WSN por su modelo de comunicación y sus limitados recursos. Los dispositivos WSN se conectan de muchos a uno, pudiendo ocasionar no solo congestión sino desequilibrios en el consumo de energía. Los autores proponen, un control de congestión basado en la jerarquía de los datos y en un esquema de consumo equilibrado de energía. En tal forma que, los nodos vecinos se inicializan en una topología jerárquica de tres tipos: 1) los mismos nodos jerárquicos, 2) los nodos ascendentes y 3) los nodos descendentes. En el método propuesto un nodo usará otros nodos vecinos de menor jerarquía cuando su nodo aguas abajo se encuentre congestionado. Luego el mecanismo de control se dará cuenta de la congestión mediante la medición de la cola y la velocidad en reenvío y recepción informando a los nodos aguas arriba para encontrar otro camino que lo libere de congestión. En cuanto a la estrategia de consumo de energía, esta equilibrará el consumo de la energía restante en los nodos de igual jerarquía propendiendo al consumo equilibrado de la energía remanente. Los resultados encontrados, demuestran que este método consigue lidiar con la congestión en forma efectiva y al mismo tiempo eliminar desequilibrios en el consumo de energía.

Esquema de Control de Congestión Rápida (FCC) para Redes Inalámbricas de Sensores que Utilizan Algoritmo de Enrutamiento Óptimo Híbrido [82], en este trabajo, los autores proponen un esquema de control de congestión rápida por medio de un algoritmo de optimización híbrido en una configuración experimental especial. Para lo cual, 1) Escoge el mejor nodo intermedio mediante la selección entre múltiples entradas a un algoritmo de optimización de tareas; el retraso en la espera, la intensidad de señal y la movilidad son consideradas como entradas múltiples del algoritmo que reduce la congestión y mejora el uso de la red. 2) Luego, utiliza un algoritmo que selecciona la ruta valorando su eficiencia energética. Resultados experimentales demuestran que el esquema FCC propuesto disminuye la congestión, reduce la pérdida de datos, el consumo de energía, maximiza el número de saltos promedio y mejora la vida útil de la red.

2.1.2 Métodos de Control de Recursos

Los métodos de control de recursos pueden aumentar o disminuir recursos, como por ejemplo aumentar el número de nodos, para administrar de mejor manera una red sin necesidad de reducir los flujos de red. Dentro de esta clasificación se encuentran:

Un protocolo cooperativo de MAC para WSN llamado COO-MAC [83], presentado con el propósito de mejorar el rendimiento en transmisión de las WSN. Para lo cual los autores proponen un esquema de asignación de canales en los nodos, basado en la maximización de las ganancias de los canales disponibles. Logrando, mediante retransmisiones la detección de accesos múltiples, la disminución de colisiones de transmisión y de desconexiones. La aplicación de este protocolo no abarca un único entorno de transmisión sino también complejas condiciones de comunicación con muchos dispositivos que pueden ocasionar congestiones, colisiones y problemas de transmisión. Mediante Análisis Numérico ha sido posible comprobar un comportamiento más justo de este protocolo alcanzando mayores rendimientos y equidad en la transmisión.

Un algoritmo dinámico de asignación de intervalos de tiempo [84], basado en la detección del entorno de la WSN. Es un sistema que consta de un gran número de nodos alimentados mediante pequeñas baterías y están ubicados en sitios de inaccesibles. En este esquema la capacidad de la red WSN es una de las especificaciones importantes a mantener. Para lo cual se utiliza Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) para dividir el marco de tiempo en pequeños espacios de tiempo y se los asigna a cada uno de los nodos de la red, logrando el objetivo de que cada nodo utilice el mismo canal en su espacio de tiempo evitando así colisiones. El algoritmo de programación TDMA propuesto por los autores ajusta en forma dinámica los espacios de tiempo (ED-TDMA), ajustando el intervalo de tiempo a la tasa de error VER del sistema. Las simulaciones demuestran que cuando la tasa de error es del 4%, la capacidad de la red mejora tres veces en comparación a la del TDMA estático; cumpliéndose que ante peores entornos el algoritmo logra mejores resultados.

Un protocolo X-MAC / BEB [85], en el que se utiliza un algoritmo de retroceso exponencial binario (BEB) coordinado con el protocolo X-MAC con el propósito de ahorrar energía mediante la disminución de colisiones en WSN altamente congestionadas. Siendo X-MAX un protocolo MAC asíncrono con ciclo de trabajo liviano, introducido con el propósito de consumir menos energía que su predecesor B-MAC. Una de las técnicas más destacadas de X-MAC es que, permite a sus remitentes enviar sus datos rápidamente al activarse sus receptores. Desafortunadamente, X-MAC no cuenta con un mecanismo de manejo de fluctuaciones repentinas causadas por nodos vecinos difundiendo sus datos en forma simultánea. Con el objeto de evaluar el algoritmo los autores crean un modelo analítico de X-MAX / BEB, en el que integran el modelo X-MAC con el modelo BEB. Encontrándose que en los resultados analíticos y de simulación X-MAC / BEB superan a X-MAC en rendimiento y consumo de energía en redes WSN muy congestionadas.

Un algoritmo de asignación multicanal (MACA) [86], basado en la prevención de congestión para reducir interferencias entre nodos y prolongar la vida natural de las WSN usables conocidas

como WWSN, cuya asignación multicanal constituye un tema muy importante de aplicación de las WSN. El algoritmo propuesto detecta la congestión y compara la capacidad de transmisión de cada nodo en los canales disponibles, seleccionando el más adecuado para la transmisión de datos en curso. El algoritmo reduce conflictos por selección de canales y mejora el comportamiento de toda la red. Las simulaciones comprueban que los resultados obtenidos mediante este algoritmo mejoran el comportamiento de la red en un 50%, en comparación a los obtenidos mediante un algoritmo de asignación multicanal (MAGT) basado en la teoría de juegos.

2.2 Técnicas Tradicionales de Asignación de Canal

La mayoría de las WSN funcionan en la banda libre ISM de 2.400MHz, compartiéndola con otras tecnologías, entre las cuales, los dispositivos Wifi son los que más interfieren a las WSN. Motivo por el cual, son necesarios diversos mecanismos que les permita funcionar en medios congestionados, más aún cuando la demanda de nuevos servicios inalámbricos continúa creciendo [87]. A continuación se muestran características de uso importantes de las WSN; así como también el Espectro Asignado a las WSN; para finalmente presentar una muestra representativa de las Técnicas Tradicionales de Asignación de Canal desarrolladas por la comunidad internacional [88].

2.2.1 Aspectos relevantes de las WSN

La tecnología predominante en la que se basan la WSN está descrita en la especificación del standard IEEE 802.15.4; el cual fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) y ratificado en el 2003 después de varios años de esfuerzo [89]. En el estándar se definen la Capa Física y la Capa de Nivel de Acceso al Medio (MAC). La capa física es la responsable de la transmisión y recepción de datos usando un canal que emplea una modulación y un mecanismo de ensanchamiento de banda. La capa MAC en cambio proporciona una interfaz entre la capa física y los protocolos de capas superiores de las Redes de Área personal de Baja Velocidad (LR-WPAN), los cuales generalmente no poseen infraestructura y si la tienen es mínima. Aun cuando este estándar no fue específicamente desarrollado para las WSN, es evidente que deja la puerta abierta para su desarrollo, ya que las WSN se sustentan en sus principios básicos [90].

En la descripción del estándar se sugiere pero no se describen las técnicas de red, quedando abierto a futuros desarrollos del protocolo y mejoras del radio. En estas circunstancias las

nuevas investigaciones aprovecharían los logros ya alcanzados con el estándar para la construcción de nuevos y mejores productos [91].

Las frecuencias de trabajo permitidas a los dispositivos inalámbricos en sus transmisiones son de uso libre y se encuentran distribuidas en bandas diferentes; las cuales pueden ser visualizadas en la Tabla 2.1, mostrando un total de 27 canales, junto a otros parámetros de radio frecuencia. Con la particularidad de que la banda de los 2.4 GHz es aceptada universalmente, lo cual ha suscitado mayor interés entre los fabricantes para el desarrollo de nuevos dispositivos inalámbricos empleando esa banda [92].

Tabla 2.1: Bandas de Frecuencias y Velocidades de las WSN [92]

Bandas	868 MHz	915 MHz	2400 GHz
Región	UE/JAPAN	EEUU	MUNDO
Número de Canales	1	10	16
Velocidad (Kbps)	20	40	250

Otros aspectos de importancia en el tratamiento de las WSN son: la Arquitectura de Red, sus Componentes y la Topología de Red.

Arquitectura de Red

Una representación gráfica de la arquitectura de estos componentes se muestra en la Figura 2.1, donde se observa la arquitectura de estos dispositivos. El estándar presenta especificaciones únicamente para dos capas, para la capa física que es la que controla las características de los canales de radio frecuencia y para la capa de control de acceso al medio (MAC) que ejerce funciones de control sobre la información que pasa a la capa física. Como su origen del protocolo IEEE 802.15.4 es el protocolo IEEE 802, incorpora un control de enlace como función estándar común a todos los protocolos IEEE 802 [93]. Sin embargo el estándar IEEE 802.15.4 no describe las capas superiores del modelo de referencia OSI/ISO utilizado como estándar de referencia para interconectar sistemas de distinta procedencia. Existiendo claras diferencias entre ambos modelos [94]. El uno completo y el otro con solamente dos capas.

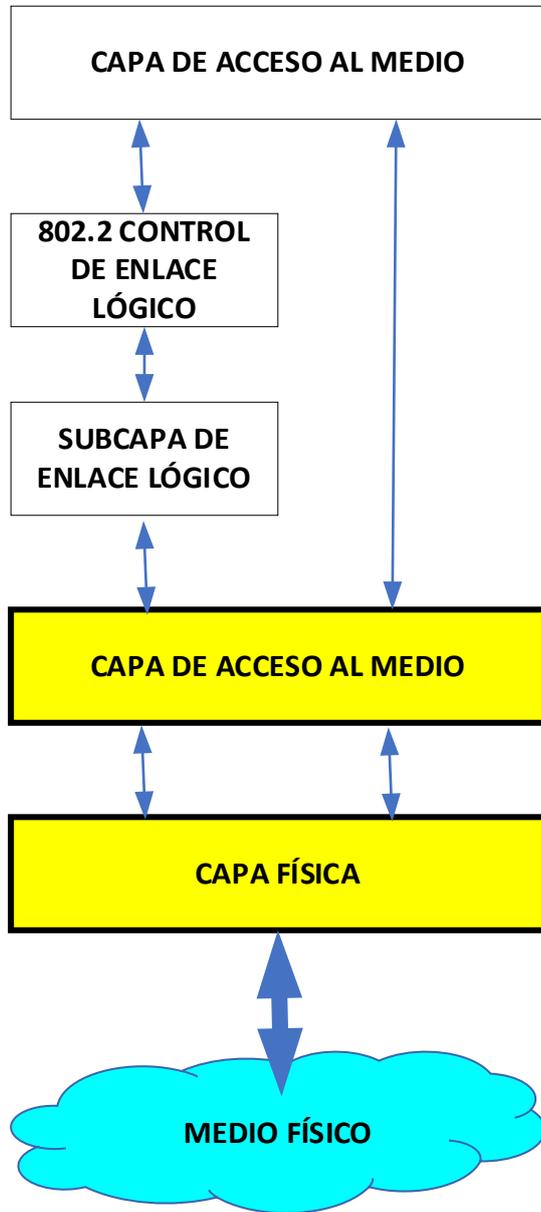


Figura 2.1: Arquitectura del dispositivo IEEE 802.15.4 [92]

Componentes de Red

Una LR-WPAN de acuerdo al Estándar IEEE802.15.4, soporta dos tipos de dispositivos:

Un Dispositivo de Función Completa (FFD), el cual soporta tres modalidades de trabajo, pudiendo servir como: 1) Coordinador de una Red de Área Personal (PAN), identificando su propia red a la cual pueden asociarse otros dispositivos. 2) Coordinador para sincronización de servicios mediante la señal de una baliza. Este coordinador debe estar asociado a un Coordinador PAN y no tiene capacidad de constituir su propia red. 3) Un Dispositivo Simple, sin capacidad para poder realizar las funcionalidades anteriormente indicadas [95].

Un Dispositivo de Función Reducida (RFD) es un dispositivo con implementación mínima del protocolo IEEE 802.15.4, utilizado para tareas simples como el encendido y apagado de una luz, pero que solo podrá asociarse a un FFD [95].

Topología de Red

En el Estándar se definen dos tipos de topología de acuerdo a las necesidades de conectividad: la Topología Estrella y la Topología Puerto-Puerto. Además reconoce una tercera topología de Agrupación en Árbol como resultado de la combinación de las dos anteriores. Para el propósito de esta tesis se usará la Topología Estrella, que es tratada a continuación

La Topología Estrella (Figura 2.2), posee un solo Coordinador PAN que adopta una identificación única en su entorno y crea su propia red. El paradigma de comunicación de esta red es centralizado cada FFD o RFD que se añade a la red deberá enviar su información al Coordinador PAN, que es el encargado de enviarla a su destino [96].

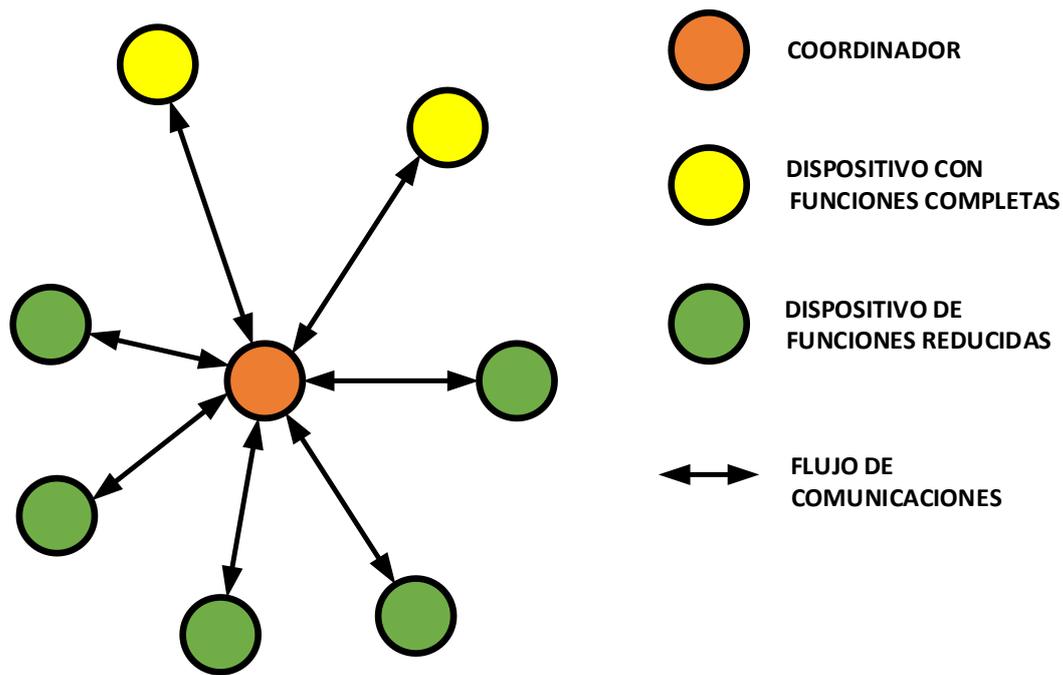


Figura 2.2: Modelo de Topología Tipo Estrella [96]

2.2.2 Espectro asignado

De acuerdo al standard IEEE 802.15.4 del año 2006 [92], se presentan tres bandas de operación que se conocen en forma general como bandas de: 2.4GHz, 915MHz y 868MHz. La banda de 2.4 GHz - 2.4835 GHz es aceptada universalmente y permite el funcionamiento de 16 canales empezando con la frecuencia pico de 2405 MHz, con 5 MHz de separación entre canales (Figura 2.3). Cada canal en esta banda posee un ancho de banda de 2 MHz como puede apreciarse en la Tabla 2.2, donde se presentan las frecuencias de operación más baja y la más alta para cada banda.

La tasa de datos de los dispositivos a 2.4 GHz es de 250 Kbps, para los de 915 MHz es de 40 Kbps y para los de 868 MHz es de 20 Kbps. Las frecuencias más bajas poseen la característica de alcanzar mayores rangos de transmisión debido a que tienen menores pérdidas de transmisión, mientras que en transmisiones con frecuencias más altas, disminuyen los rangos de transmisión y las pérdidas aumentan. Los dispositivos WSN y CR-WSN de 2.4 GHz son los utilizados en esta tesis, pero como se indicó con anterioridad, comparten la banda con otros dispositivos siendo sus principales interferentes las WLAN. En la Figura 2.4 se puede observar, en la zona de interferencias marcada, que un canal WLAN interfiere hasta cuatro canales Wifi.

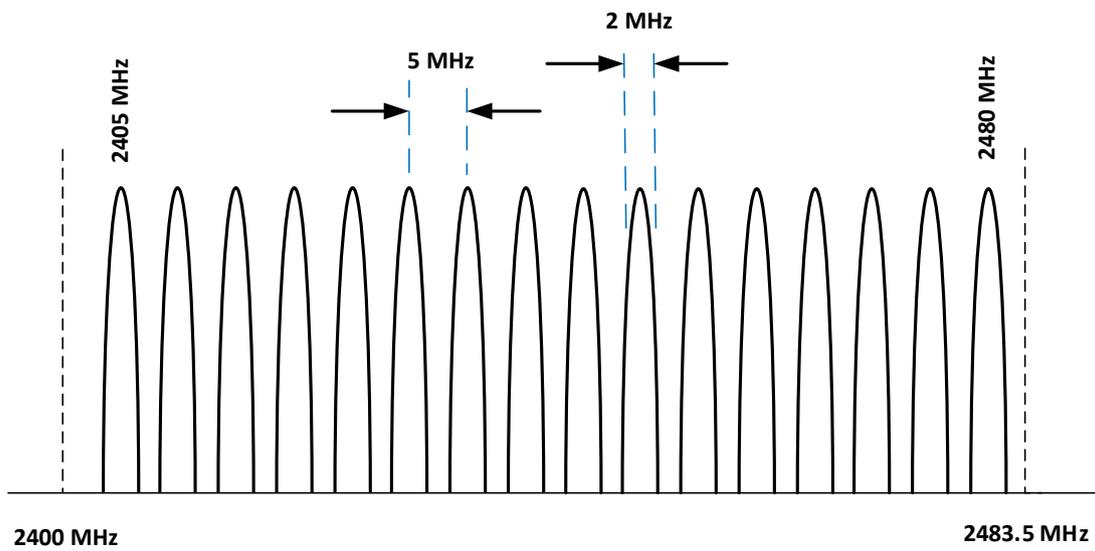


Figura 2.3: Banda WSN de 2.4 GHz [97]

Tabla 2.2: Frecuencias Centrales para dispositivos de 2.4 GHz [97]

Número de Canal	Frecuencia Baja (MHz)	Frecuencia Central (MHz)	Frecuencia Alta (MHz)
1	2404	2405	2406
2	2409	2410	2411
3	2414	2415	2416
4	2419	2420	2421
5	2424	2425	2426
6	2429	2430	2431
7	2434	2435	2436
8	2439	2440	2441
9	2444	2445	2446
10	2449	2450	2451
11	2454	2455	2456
12	2459	2460	2461
13	2464	2465	2466
14	2469	2470	2471
15	2474	2475	2476
16	2479	2480	2481

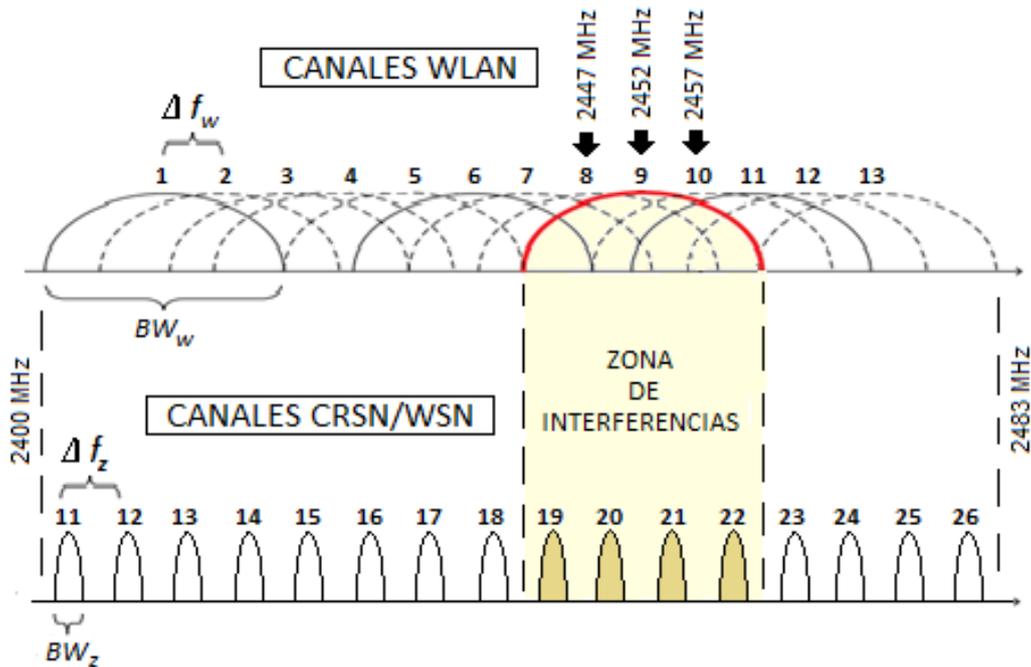


Figura 2.4: INTERFERENCIA POTENCIAL ENTRE CANALES CRSN/WSN Y WLAN EN BANDA ISM [98]

2.2.3 Contribuciones con Técnicas Tradicionales de Asignación de Canal

En este subcapítulo se presenta una muestra representativa de las contribuciones presentadas por la comunidad científica, para resolver los problemas de asignación de recursos radio mediante Técnicas Tradicionales de Asignación de Canal para disminuir la congestión de las WSN.

Pakparvar et al. en [99], se preocupan por la mitigación de las interferencias perjudiciales a causa de la coexistencia entre las WSN y los dispositivos Wifi. Para lo comparan dos mecanismos de selección de canales basados en un nuevo protocolo multicanal, uno de los cuales emplea un dispositivo de detección de espectro auxiliar y el otro no. Los algoritmos utilizados se centran en lograr realizar una selección dinámica de canales que permita la coexistencia de las redes inalámbricas mencionadas. Los algoritmos se implementaron sobre una red inalámbrica existente y pueden tener ayuda o no del dispositivo auxiliar de detección de espectro. Para la evaluación de los resultados se realizó la implementación con dispositivos y mediciones reales utilizando un banco de pruebas. Lo cual permitió experimentalmente hacer la verificación de las métricas empleadas en el proceso para poder así encontrar las selecciones de canales más convenientes. Los resultados validaron la bondad de los dos métodos, enfatizando un mejor desempeño del empleo de dispositivos auxiliares para casos de alta

congestión.

Zengen et al. en [100], desarrollaron un sistema de medición completa en cada uno de los nodos con el propósito de calificar los 16 canales e indicar el mejor para cada link. Para lo cual el sistema propuesto lleva a cabo las siguientes tareas: La medición de la calidad de los canales para ir estableciendo su valoración en línea; siendo esto necesario como mecanismo de adaptabilidad en caso de cambios de ambiente de trabajo y poder determinar el más adecuado. En la realización de estas tareas el sistema tiene la capacidad de cambiar de canal sin perder la conexión con cada uno de los nodos de la red ya que la pérdida de un nodo podría causar el mal funcionamiento o falla de la red. En caso de no poder acceder a un nodo por cambio de canal, el sistema tiene que poder decidir si el nodo que se perdió puede recuperarse o no; ante un fallo de batería un nodo debe ser excluido para evitar mayor desgaste por intentos de recuperación. En este sistema una función de autoconfiguración permite seleccionar los canales adecuados al agregar nuevos nodos a la red. Por último el sistema propone una topología de red tipo anillo con un método de transporte de datos confiable de nodo a nodo.

Kim et al. en [101], proponen para las WSN, un protocolo de eficiencia energética multicanal llamado Y-MAC, con el objeto de poder mejorar la eficiencia energética en diversas condiciones de tráfico. A diferencia de otros protocolos, realiza una implementación experimental real para evaluar rendimientos, demostrando no solamente eficiencia energética sino un alto rendimiento para condiciones de alto tráfico. Como principales contribuciones de este protocolo se pueden presentar las siguientes dos: 1) Y-MAC propone un mecanismo de salto de canal ligero, que no asigna a los nodos canales fijos evitando canales redundantes. Al inicio se utiliza el canal base, pero ante una ráfaga de tráfico, un receptor con sus posibles emisores pueden utilizar canales adicionales según la secuencia de salto correspondiente. 2) Comparado con otros protocolos similares anteriores, Y-MAC, en condiciones normales de tráfico logró respuestas similares, pero ante condiciones de alto tráfico con mensajes en ráfaga, logra respuestas mucho más efectivas, manteniendo un bajo consumo de energía.

2.3 Técnicas de Asignación de Canal con Acceso Oportunista al Espectro

Dado el gran crecimiento de las aplicaciones con WSN, las comunicaciones en el espectro sin licencia (e.j. ISM) se han visto congestionadas, mientras existen otras bandas concesionadas, que presentan marcados estados de subutilización. Esta subutilización del espectro presenta variaciones temporales y geográficas, es decir depende del momento y del sitio de uso. Estas características más el desarrollo de nuevos dispositivos, ha permitido la incorporación de

nuevas técnicas para combatir la congestión de las WSN cuando los métodos tradicionales no son capaces de hacerlo [102].

En este capítulo para abordar estos temas, se hace un breve estudio de: el Acceso Dinámico al Espectro, de la CR, del Estándar para el Uso de Espacios Blancos de TV, para finalmente presentar algunos aportes de la comunidad científica reunidos bajo el título de Esquemas de Asignación de Canales con Acceso Oportunista al Espectro.,

2.3.1 Acceso Dinámico al Espectro

El manejo actual del espectro radioeléctrico está basado en políticas estáticas de asignación espectral, lo cual en la actualidad resulta ineficiente. Motivo por el cual la FCC, propuso modificaciones en la administración espectral más acordes con las nuevas realidades tecnológicas [103].

Estas nuevas políticas de manejo espectral se conocen como DSA. Con DSA se permite a los usuarios de bandas secundarias hacer uso de otras bandas conocidas como primarias, en casos requeridos, siguiendo ciertas reglas específicas [104]. Al respecto, los autores en [105], presentan una recopilación de las técnicas DSA, categorizándolas en tres modelos: Modelo Dinámico de Uso Exclusivo, Modelo de Compartición Abierta y Modelo de Acceso Jerárquico. Resumidos en la taxonomía presentada en la Figura 2.5, cuyas características son presentadas a continuación.

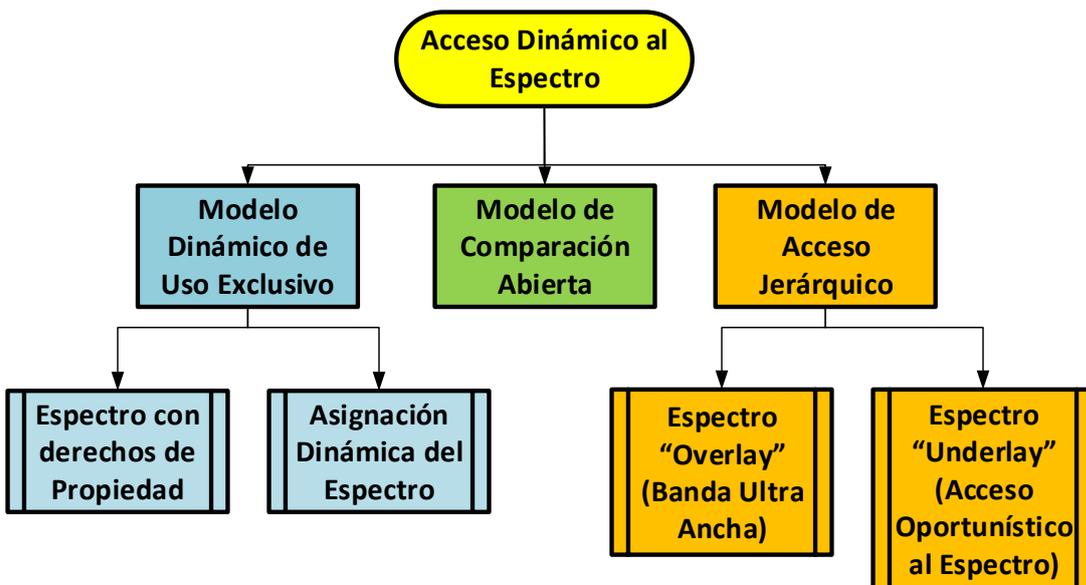


Figura 2.5: Taxonomía del Acceso Dinámico al Espectro [105]

Modelo Dinámico de Uso Exclusivo

Este modelo mantiene la estructura básica del manejo de asignaciones en la política actual, otorgando a los propietarios de las bandas licenciadas su uso exclusivo; pero añadiéndoles cierta flexibilidad de operación mediante dos posibilidades: Espectro con Derecho de Propiedad [106] y Asignación dinámica al Espectro [107].

Espectro con Derecho de Propiedad: permite, en forma no obligatoria, a los usuarios licenciados vender, arrendar o intercambiar libremente su porción de espectro, así como también escoger sin restricciones la tecnología más conveniente que permita obtener los mejores beneficios de uso para este limitado recurso.

Asignación Dinámica al Espectro: posibilidad, impulsada por el Proyecto Europeo Drive [108], que incrementa la eficiencia espectral mediante la aplicación de DSA que explota el aprovechamiento estadístico del comportamiento de las características espacial y temporal en cada sitio, para realizar asignaciones a diversos clientes.

Modelo de Compartición Abierta

Conocido también como espectro común, es un modelo que permite el uso libre y compartido del espectro, permitiendo a los usuarios un acceso igualitario sin la injerencia de indebidas regulaciones de los organismos de control de frecuencias. El respaldo mayoritario a este modelo proviene de los partidarios del relativo éxito obtenido por los servicios inalámbricos ofrecidos dentro de la banda ISM [109].

Modelo de Acceso Jerárquico

Construido en base a una estructura jerárquica de compartición del espectro, conformada por PU y SU, limitando la interferencia percibida por los PU (licenciados). En tal forma que los SU pueden acceder a bandas primarias sin afectar la operación de los PU, de acuerdo a dos modalidades: Espectro bajo el nivel de ruido (Underlay) y Espectro sobre el nivel de ruido (Overlay).

Espectro bajo el nivel de ruido (Underlay): Este modelo impone severas restricciones en la potencia de transmisión de un dispositivo secundario, en tal forma que se mantenga debajo del piso de ruido del dispositivo primario. Estas restricciones solo permiten transmisiones en cortas

distancia de dispositivos operando a muy baja potencia [110].

Espectro sobre el nivel de ruido (Overlay): A diferencia de la modalidad anterior, no impone necesariamente restricciones severas en la de potencia de transmisión a los SU, eso sí es importante identificar cuando y donde pueden transmitir [111]. Este esquema, permite a los SU, la explotación oportunista instantánea, de disponibilidades espectrales tanto en tiempo como en espacio, siempre y cuando no perturben el funcionamiento de los usuarios con licencia. Hecho que constituye un aspecto central en la implementación de esta tesis, y que de aquí en adelante será mencionado como OSA.

2.3.2 Radio Cognitiva

Como se mencionó anteriormente, esta tesis se centra en el enfoque de Espectro sobre nivel de ruido “overlay”, del modelo de acceso jerárquico de acceso dinámico al espectro. El término CR fue propuesto por primera vez por Mitola en 1999 [112]; el mismo que fue explorado por el programa DARPA Next Generation (xG) [113] bajo el término OSA. La coexistencia de SU y PU era concebida por Mitola siempre y cuando se cumpla con la implementación de un ciclo cognitivo que se realiza durante el proceso en cuestión.

La CR consiste en un sistema de radio que interactúa con el ambiente y que tiene la capacidad cognitiva de determinar nuevos parámetros de transmisión y capacidad de reconfigurarse adoptando rápidamente esos nuevos parámetros [114]. Estas capacidades, no existentes en anteriores dispositivos, son las que permiten al SU operar en banda primaria leyendo previamente el entorno y reconfigurándose para adaptarse rápidamente a nuevas condiciones de transmisión.

La CR es una tecnología de amplias perspectivas que puede ser aplicada a diversas circunstancias. Para mejorar el desempeño de las redes de telecomunicaciones inalámbricas se utiliza aplicaciones de acceso dinámico al espectro en base a CR conocidas como OSA [115]. OSA proporciona a los SU la capacidad de utilizar un canal inalámbrico de usuarios con licencia de forma oportunista, de acuerdo a ciertas reglas, mejorando su desempeño.

Componentes de Red

Como componentes básicos de una red de CR están una red primaria y una red secundaria. En estas redes, los segmentos sin uso de las bandas primarias propiedad de los PU, pueden ser usados en forma temporal por los SU a pesar de no poseer licencia para hacerlo [116] [117].

La arquitectura de red CR se compone de la red primaria y la red secundaria. En estos tipos de redes, los segmentos no utilizados de bandas con licencia propiedad de los PU pueden ser utilizados temporalmente por SU, a pesar de que las SU no tienen los derechos de uso del espectro.

La red primaria está conformada por una o más estaciones base primaria, que poseen licencia de operación en sus respectivas bandas. Su funcionamiento es en modo de infraestructura, de tal forma que las estaciones base son las que ejercen control sobre las actividades de los PU. Cuyas actividades no deberán verse afectadas por los SU, ya que tienen prioridad de acceso.

La red secundaria no posee una licencia para operar en una banda deseada, por tanto requiere de capacidades adicionales, que les permita cumplir con estrictos requisitos de operación, para acceder a una banda con licencia. Los SU también pueden contar con estaciones base secundarias que proporcionen conexiones de un salto a dichas redes.

Heterogeneidad del Espectro

La heterogeneidad del espectro se conoce como la capacidad de los SU para operar tanto en los segmentos no utilizados del espectro con licencia, como en las porciones no licenciadas del espectro a través de tecnologías de acceso de banda ancha. En tal forma que los SU tienen posibilidades de operación en bandas con licencia y en bandas sin licencia [118].

Para el primero de los casos, los PU tienen prioridad para usar la banda con licencia. Por lo tanto, en esta banda, las redes secundarias están dedicadas a la detección de PU. La capacidad del canal secundario toma en cuenta la interferencia de PU cercanos; en cuyo caso, las SU deben dejar de usar inmediatamente la banda autorizada y pasar a otro segmento del espectro disponible para su operación.

Para la operación en banda sin licencia, el derecho de acceso a esta banda es el mismo para todos los SU; mientras que, los PU no operan en esta banda.

Heterogeneidad de la Red

En el esquema planteado los SU pueden acceder a una red de tres maneras diferentes. La primera con acceso a su propia estación base secundaria, pudiendo acceder al uso de canales tanto en bandas con licencia como en bandas sin licencia. La segunda, acceso ad hoc secundario tanto en bandas con licencia como sin licencia. Y tercero, mediante acceso a canales de la red primaria [119].

Administración Espectral

Para que los SU puedan coexistir con los primarios se deberán de implementar un conjunto de funciones de acuerdo con el ciclo cognitivo propuesto [120]. Con dichas funciones se pueden detectar espacios vacíos o en blanco del espectro en la banda con licencia, seleccionar las mejores frecuencias de operación, coordinar el acceso al espectro con otros usuarios y desalojar la banda de frecuencia con licencia cuando aparece un usuario primario. Las mencionadas funciones son las que permiten la implementación del ciclo cognitivo, el mismo que se explica a continuación de manera rápida [119].

Sensado del Espectro

Mediante la detección de espectro, se permite al SU que hace uso de la CR, detectar e identificar espacios espectrales disponibles conocidos como agujeros o espacios blancos. Esta detección también permite informar sobre la interrupción de uso del espacio blanco, con el arribo de un PU al espacio blanco ocupado por el SU [121] [122].

Decisión Espectral

La función de decisión de espectral se relaciona con la selección del mejor canal de operación en base a los agujeros de espectro detectados y de acuerdo a criterios específicos [123].

Compartición del Espectro

Debido al uso compartido del espectro, varios SU podrían tener acceso a un mismo grupo de agujeros detectados. Sin embargo, las rutinas de uso compartido permiten la gestión de su

uso entre múltiples usuarios, minimizando colisiones e interferencias perjudiciales [124].

Movilidad del Espectro

Luego de seleccionar una banda espectral adecuada, el SU elige el mejor canal disponible y comienza su comunicación. Sin embargo, por la dinámica del entorno inalámbrico, ya sea por deterioro del comportamiento del canal inalámbrico o por el requerimiento de un PU para ocuparlo, se deberá buscar un nuevo canal de trabajo [121]. En este caso, el SU deberá cambiar su canal de operación recurriendo a la función de movilidad del espectro, para evitar interferencias perjudiciales.

2.3.3 Estándar para el Uso de Espacios Blancos de TV

Varios estudios y mediciones han demostrado la subutilización de algunas bandas frecuenciales en ciertos momentos y lugares. Encontrándose en particular, que las bandas de televisión tienen porciones de espectro no utilizado. Despertando un gran interés por el acceso dinámico de los espacios blancos entre los investigadores, fabricantes de equipos inalámbricos y organizaciones desarrolladoras de normas. Todo esto condujo a que el IEEE, Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, asociación mundial de ingeniería dedicada a la normalización y desarrollo de áreas técnicas, desarrollara un nuevo standard, publicado en febrero del 2016, para sistemas de radio de acceso dinámico a espacios blancos [125].

La adopción de estándares permite a las tecnologías convivir con otras. Lo cual es favorable y brinda confianza sobre la funcionalidad y desarrollo de los productos, promoviendo economías de escala. La tendencia mundial es hacia la estandarización, la misma que ha comprobado sus beneficios sobre el comportamiento del mercado en diversos productos. Por el contrario sin estándares se dificulta la autorización, desarrollo y venta de productos; con riesgos de detener nuevas investigaciones y tornarlos obsoletos en corto tiempo. Además equipos que no cuenten con un estándar podrían presentar niveles de operación perjudiciales para otros usuarios del espectro [126] [127].

2.3.4 OSA y Espacios Blancos de TV

Por medio de la técnica OSA se puede acceder sin licencia a espacios del espectro sin uso,

pertenecientes a bandas con licencia sin afectar a sus PU. Los segmentos espectrales no utilizados de bandas primarias se constituyen en oportunidades a ser aprovechadas por dispositivos secundarios de CR que necesitan mejorar su desempeño [128].

En múltiples investigaciones se ha determinado el uso ineficiente del espacio electromagnético: Especialmente de segmentos como los de TV, que no se utilizan todo el tiempo y en todas las áreas [129]. Estas porciones no usadas del espectro se conocen como espacios blancos de TV (TVWS), los cuales son considerados como soluciones potenciales ante la escasez de espectro, ya que pueden ser usados como bandas primarias a ser ocupadas mediante OSA por SU.

Las transmisiones de televisión operan en bandas VHF y UHF del espectro electromagnético, utilizando un ancho de banda de 6 MHz. En los Estados Unidos el ente regulador es la FCC, empleando cuatro bandas de frecuencia: 54-72MHz, 76-88MHz, 174-216MHz y 470-698MHz. Mientras que en Europa el ente regulador es la ECC [130], utilizando bandas continuas desde los 470MHz a los 790 MHz, utilizando un ancho de banda de 8 MHz.

Tanto la FCC como la ECC han adoptado medidas para permitir el acceso oportunístico a los espacios blancos de TV mediante dispositivos de CR. Cada entidad protege los servicios existentes para sus usuarios, mientras FCC basa su protección en términos de distancia requerida, la ECC se enfoca en el control de potencia de los SU. Ambas entidades reguladoras coinciden en la utilización de tecnologías secundarias de acceso al espectro como la detección y la geolocalización mediante el uso de base de datos.

2.3.5 Mecanismos Cognitivos para Acceder a Espacios Blancos OSA y Espacios Blancos de TV

Entre los mecanismos cognitivos usados para encontrar espacios blancos de TV están la geolocalización de espectro disponible, mediante el uso de bases de datos, sensores de espectro y balizas.

Mediante el uso de una base de datos de geolocalización confiable, los SU pueden consultar la disponibilidad de algún TVWS en su área de influencia, para usarlo como canal inalámbrico de transmisión sin interferir otros servicios [131] [132] [133]. Las bases de datos se alimentan de información obtenida de sensores de espectro localizados en posiciones convenientes de medición.

En la Figura 2.6 se observa un esquema funcional que propone la utilización de un sistema base de datos para la geolocalización de TVWS, propuesto por OFCOM [134] [135], el cual podría ser consultado por un SU que lo requiera. La base responde refiriéndolo a bases de datos más cercanas, marcadas como DTT (que indica el espectro de Televisión Digital Terrestre que puede usarse) y la PMSE (referido a programas y equipos especiales como los micrófonos que usan la banda), con las cuales el dispositivo intercambia información y obtiene un canal de transmisión seguro, con detalles de frecuencias y niveles de potencia que puede usar para no interferir a otros usuarios.

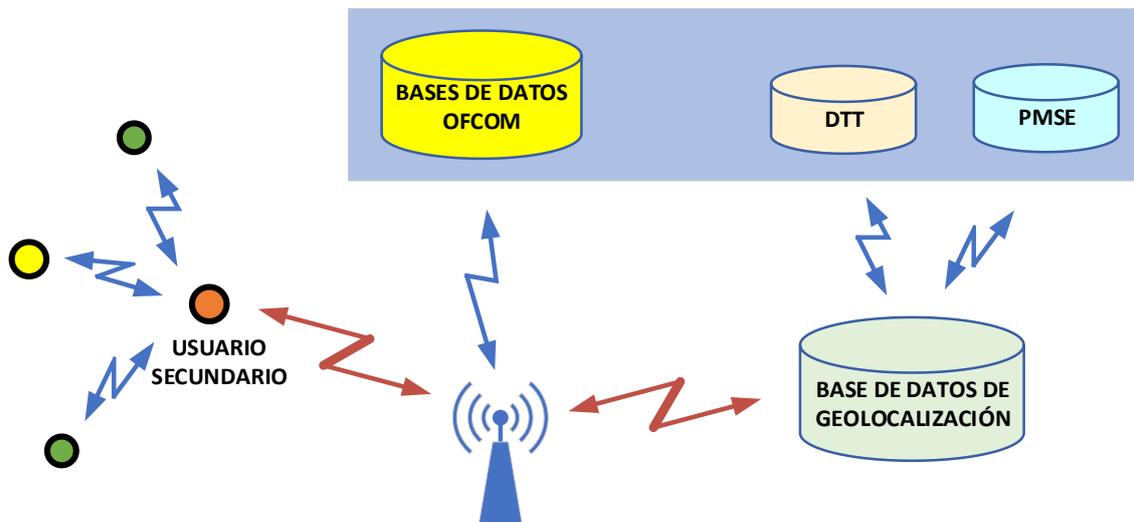


Figura 2.6: Esquema Funcional de Acceso a Espacios Blancos de TV [134]

La información de los sensores de espectro puede ser aprovechada directamente por sistemas que así lo requieran. Mientras que la utilización de balizas es la menos utilizada porque requiere de una cierta infraestructura para la emisión de una señal periódica de información.

2.3.6 Contribuciones de Asignación de Canales con Acceso Oportunista al Espectro

En este subcapítulo se presenta una muestra representativa de las Contribuciones presentadas por la comunidad científica, para resolver los problemas de asignación de recursos radio mediante técnicas de Asignación de Canales con Acceso Oportunista al espectro, para disminuir la congestión en las WSN.

Cardei y Mihnea en [136], aplican a las WSN un sistema de control robusto mediante un algoritmo distribuido, para asignar un canal a cada radio, formando una topología de red robusta ante la presencia de un PU. La restricción de la robustez implica que si un canal es requerido por el primario, la topología entre nodos del SU resultante, mantenga su conectividad. En la topología de red se destaca la forma de conectividad convergente donde diferentes nodos (como por ejemplo nodos sensores) conllevan información hasta un solo nodo (el sumidero). Cada nodo sensor está equipado con Q radios y hay N canales disponibles con $N \geq Q$. En el caso de nodos con al menos dos radios, si el usuario principal usa uno de los canales, entonces la topología de SU queda conectada con el otro canal sin perder conectividad. En caso de elevadas interferencias, estas son causantes de severos inconvenientes para este tipo de asignación. Dentro de lo permitido por el sistema están también las transmisiones en paralelo, lo cual reduce las interferencias, incrementando la capacidad de la red y disminuyendo los retrasos en las comunicaciones.

Byun et al. En [137], consideran una asignación centralizada de recursos espectrales, para redes con recursos limitados como las WSN. Las cuales las consideran, en su experimentación, ubicadas dentro de un rango de celda o barrera de segmento. Los sensores que van a transmitir datos, deben solicitar a su coordinador central los recursos espectrales requeridos; ante lo cual, el coordinador atiende el pedido de acuerdo a los siguientes cuatro lineamientos: 1) La asignación de recursos debe ser en la forma más justa posible. 2) Debe procurarse alcanzar la máxima utilización del recurso espectral. 3) La prioridad debe estar reflejada en la transmisión de los datos, 4) Las transferencias de espectro deben reducirse lo más posible. Siguiendo estos lineamientos, los autores formularon un problema multiobjetivo, con un nuevo enfoque, para ser resuelto mediante la teoría de juegos modificada (MGT). Los resultados obtenidos mediante la experimentación demostraron en forma numérica una asignación de bandas más justa, respetando prioridades entre los datos y minimizando los cambios espectrales.

Askari et al. [138], presentan en un esquema cognitivo nuevo, una red CR-WSN, donde una WSN considerada como SU combina su banda de operación con el uso de banda primaria. Para esto, utilizan un modelo que divide el espectro primario en M canales primarios para comunicación de PU. Cada canal primario contiene N sub-canales para el uso por los SU. En este estudio los SU son los encargados de sensar los fenómenos ambientales requiriendo por lo tanto un menor ancho de banda con respecto a los PU. En este esquema los PU se superponen sobre varios SU, en tal forma que si un PU requiere el canal, varios SU deberán cambiar de canal para dejarlo vacante. El algoritmo utilizado considerado como simple y eficiente, se basa en un proceso ordenado que separa una porción de espectro primario vacante, para que sea utilizado por los SU mientras que los PU utilizan el resto. Obviamente cuando un PU no encuentra canal vacante en el resto del espacio espectral, varios SU deberán cambiarse a otras

sub-bandas para liberar un canal para el PU. Demostrándose mediante este algoritmo disminución de la probabilidad de bloqueos y cambios de canal.

Cavalcanti et all. en [139], en su trabajo proporcionan un doble aporte: 1) Presentan un diseño conceptual de las redes cognitivas para las WSN de acuerdo con los requerimientos del modelo DSA. Identificando los principales desafíos que deben enfrentarse en la aplicación del modelo de acceso oportunista en el contexto de las WSN. Incluyendo una confiable detección y protección de incumbentes que retornan al uso de canales primarios, así como el mantenimiento de una adecuada QoS para las aplicaciones de WSN que operan con SU. Mostrando el gran potencial que representan para acceder al espectro, mejorar capacidades en la selección de canales y por ende el desempeño de las WSN, 2) Realizan un estudio de los sensores cognitivos con aplicaciones de automatización y control para residencias y locales comerciales, comparando el comportamiento de sensores cognitivos de diseño propio con el del sensor Zigbee/802.15.4; dejando en claro el promisorio comportamiento de los sensores cognitivos basados en WSN.

Capítulo 3.

Modelamiento del Escenario y Desempeño de las WSN en la Banda ISM

El rápido desarrollo de las WSN especialmente en espacios urbanos de alta densidad, ha provocado congestión de dispositivos en banda ISM. El cual continúa aumentando con el desarrollo de nuevas aplicaciones que involucran WSN, trayendo consigo cada vez más congestión y la necesidad de nuevas medidas para combatir el problema de las interferencias causadas en comunicaciones. Con el aumento de las interferencias han ido surgiendo diversos métodos para amortiguar sus efectos, entre los que se ubica el presente trabajo.

Ante esta realidad de cambios acelerados, en este capítulo se plantea un modelo de escenario que sirva como base de análisis del problema de interferencias causadas por la congestión, al que están abocadas las comunicaciones de las WSN. Más aún, ante el inminente auge de las ciudades inteligentes y del IoT que involucrará masivos despliegues de nuevos dispositivos.

En este capítulo, primero se propuso un escenario de trabajo y sobre el escenario ya planteado, se realizó la evaluación del desempeño de las WSN, mediante varios estudios que permitieron su análisis ante situaciones extremas de congestión.

3.1 Modelamiento del escenario

Este subcapítulo se apoya en tres temas interrelacionados que contribuyen decididamente en encontrar un escenario adecuado para las WSN sometidas a severas interferencias, con la capacidad de poder acoger escenarios futuros más comprometidos. Estos temas son: Descripción del Escenario, Caracterización del Espectro y Métricas de Desempeño.

3.1.1 Descripción del Escenario

El escenario en mención debe ser capaz de alojar números incrementales de WSN o CR-WSN actuando bajo interferencias. Por un lado estarán las interferencias cocanal provenientes de otras WSN o CR-WSN y por otro lado aquellas producidas por las WLAN actuando en su radio de influencia.

Con este propósito se escogió la representación de un área urbana moderna mediante dos grupos de bloques de edificios elevados de varios departamentos. Uno frente al otro separados por una calle central como se observa en una vista superior del escenario mostrada en la Figura 3.1, en donde se muestran algunos de los parámetros que son usados para dimensionar el escenario.

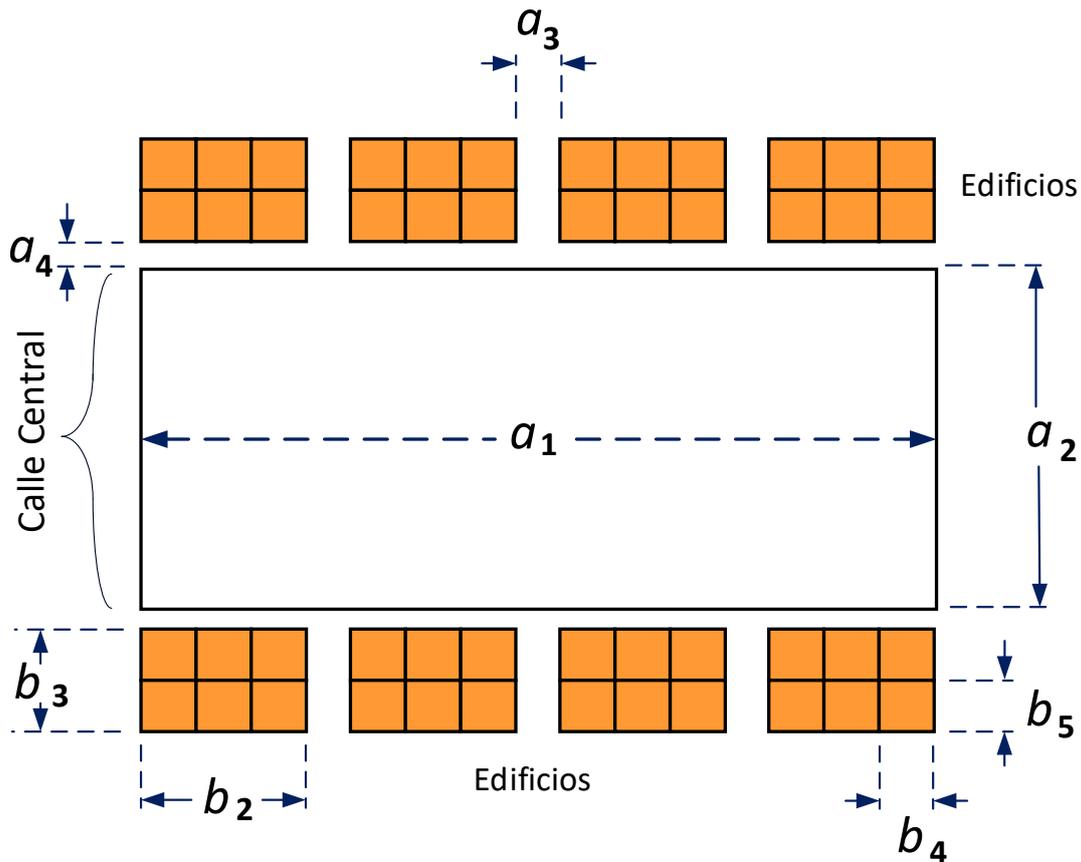


Figura 3.1 Vista Superior del Escenario

En este escenario es posible hacer la representación de altas densidades de interferencias, debido a la posibilidad de poder contener masivos despliegues de dispositivos WLAN (e.g. AP) y WSN. En la calle central es posible ubicar múltiples sensores en topología estrella, cada uno compuesto de un coordinador (C), vinculado a uno o varios sensores (S). Es importante indicar que en un instante determinado, un solo sensor transmite a su coordinador, de tal manera que si se refleja esta situación mediante una fotografía instantánea, podría observarse una representación como en la Figura 3.2, en la que se muestran los pares (S→C) que se encuentran en un proceso instantáneo de comunicación a una distancia de separación r .

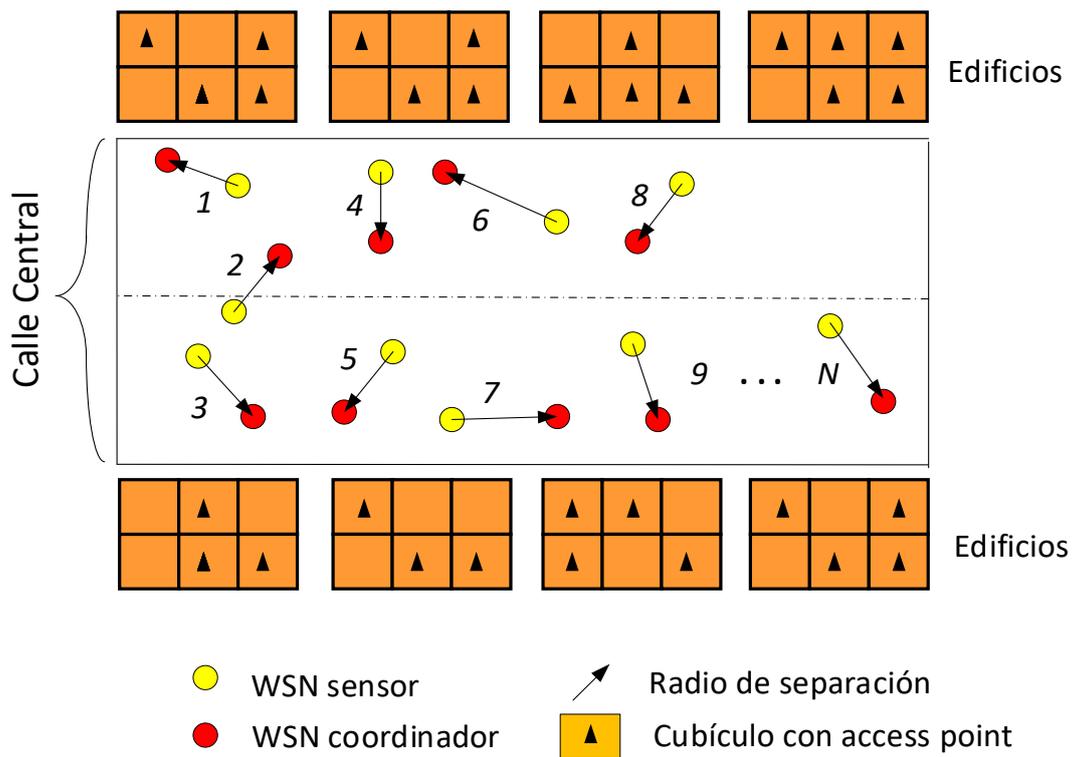


Figura 3.2. Instantánea de Calle Central del Escenario

Las WLAN se colocaron en la topología de infraestructura dentro de cada apartamento de los edificios del escenario (ver Figura 3.3), lo que permite que los AP brinden acceso inalámbrico, irradiando interferencia hacia pares de sensores ubicados en la calle central. Para indicar la presencia de los AP se dibujó un triángulo dentro de cada apartamento. En el mismo gráfico se puede observar la altura b_1 de los edificios, cuyo largo y ancho ya se mostraron en la Figura 3.1. La presencia de los dispositivos AP puede activarse según los niveles de interferencias que se quieran alcanzar (e.g., activación por piso). A manera de ilustración se

muestra cómo actúa por un lado, la interferencia de un AP sobre una cierta potencia de transmisión P que recibe un coordinador desde uno de sus sensores y por otro lado la interferencia cocanal provocada por otro sensor.

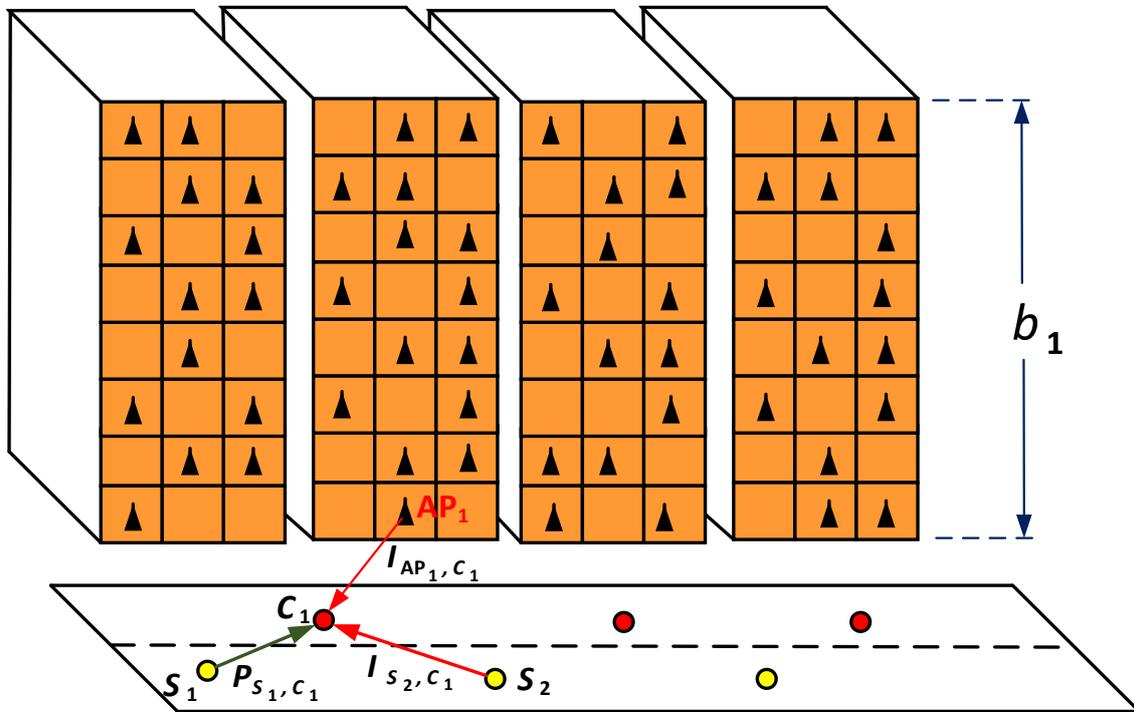


Figura 3.3. Vista Lateral del Escenario desde Calle Central

3.1.2 Caracterización del Espectro

En un escenario urbano como el descrito anteriormente, los dispositivos WSN y WLAN implementados, comparten la misma banda ISM de operación como se muestra en la Figura 2.4. De modo que el WSN podría estar sujetas a interferencias ya sea de otra WSN o de las WLAN. En el caso de interferencia desde otra WSN, esta es causada por la interferencia cocanal de otra WSN cercana, ya que, dependiendo de la cantidad de dispositivos desplegados, sería necesario reutilizar el canal de transmisión. Un canal WLAN, dependiendo de su ubicación, puede superponerse por completo a varios canales WSN. Por ejemplo, en la Figura 3.4, el canal WLAN 9 se superpone a los canales WSN 19, 20, 21 y 22 [140]. Los canales WSN tienen un ancho de banda BW_z y una separación entre las frecuencias centrales de Δf_z . Por otro lado,

los canales WLAN utilizados por los AP tienen un ancho de banda BW_w y una separación entre las frecuencias centrales de Δf_w .

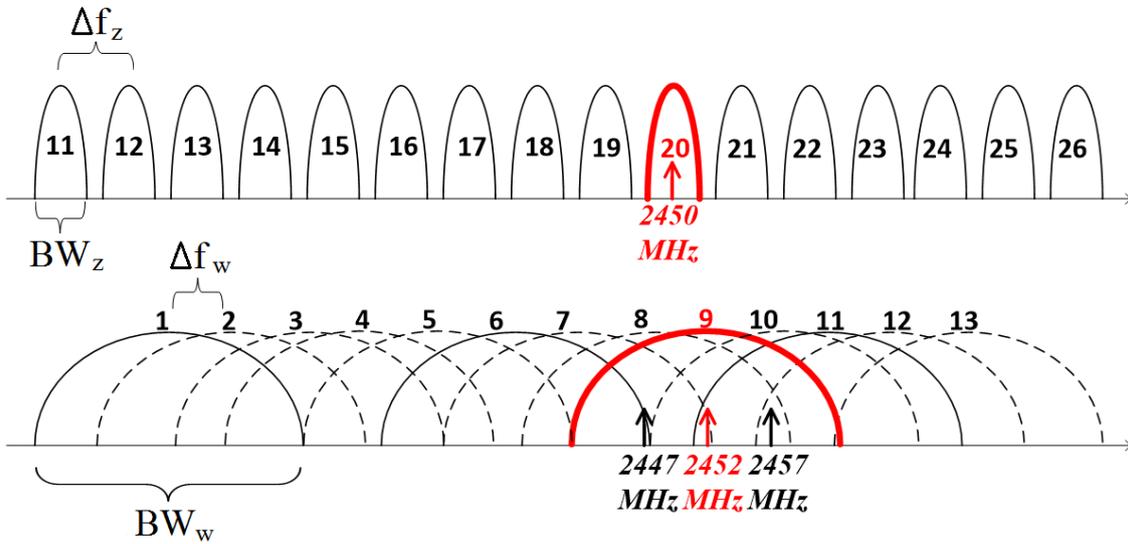


Figura 3.4 Asignación de Canales para WSN y WIFI [140]

3.2 Métricas de Desempeño

En este documento, el rendimiento de las WSN viene dado principalmente por la capacidad del canal que los coordinadores pueden establecer con sus sensores. En este sentido, la capacidad del canal de cualquier coordinador C_i se puede calcular utilizando la siguiente expresión [140]:

$$CC_i = B \log_2(1 + \text{SINR}_i) \quad (3.1)$$

donde CC_i , representa la capacidad del canal del coordinador C_i , en bps; B es el ancho de banda en hercios; y, SINR_i representa la relación señal a ruido más interferencia, medida en el coordinador C_i ; y, se calcula de la siguiente manera [141]:

$$\text{SINR}_i = \frac{P^r_{S_i C_i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N I_{S_j C_i} + \sum_{l=1}^K I_{AP_l C_i} + \text{Ruido}} \quad (3.2)$$

donde $P^r_{S_i C_i}$ es la potencia recibida en el coordinador C_i del sensor S_i , como se puede ver en la Figura 3.5. El factor $\sum_{j=1, j \neq i}^N I_{S_j C_i}$ representa la interferencia de otros sensores $S_j; j \neq i$; y $\sum_{l=1}^M I_{AP_l C_i}$ corresponde a la interferencia que proviene de los AP. Estos casos de interferencia ya se indicaron en la sección anterior. Finalmente, el término ruido representa el piso de ruido en el receptor.

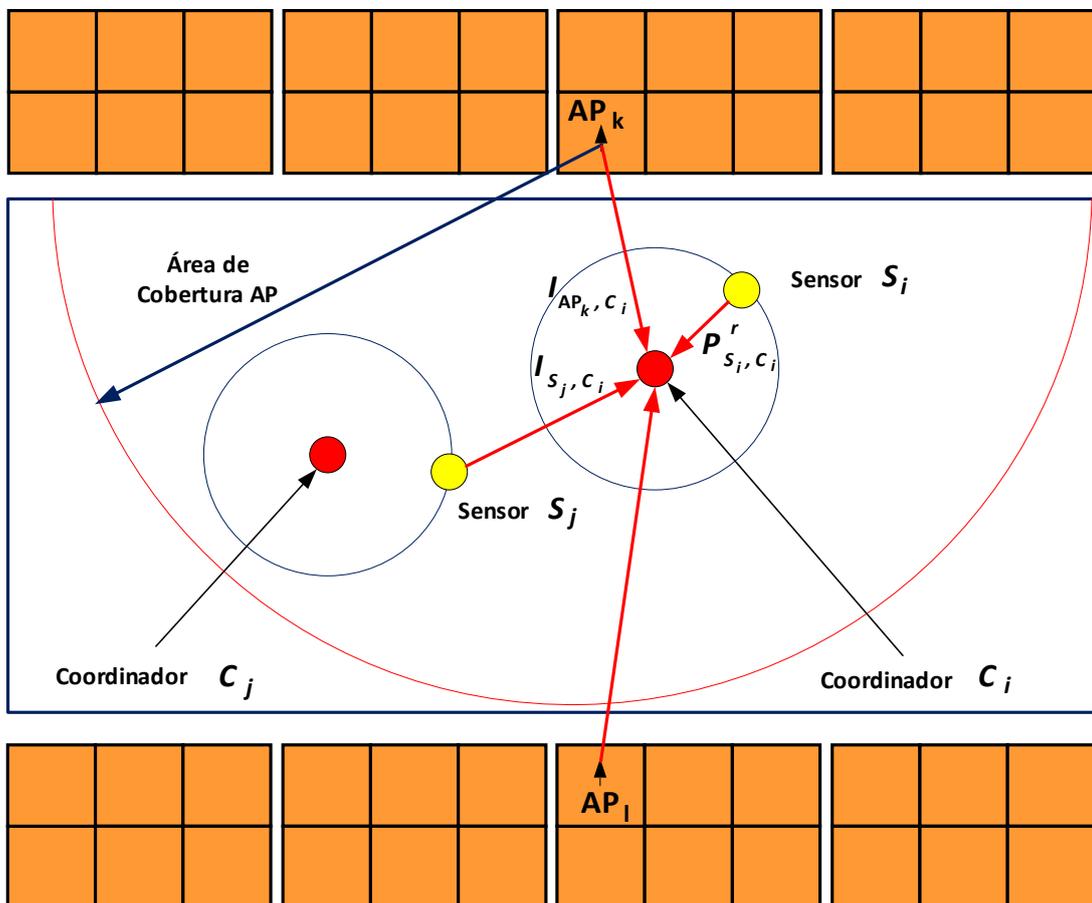


Figura 3.5 Interferencia sobre un Coordinador

La potencia recibida por el coordinador C_i se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$P_{S_j, S_i} = P_{S_i} - L_{S_j, S_i} \quad (3.3)$$

donde P_{S_i} , es la potencia transmitida por el sensor S_i , y L_{S_j,S_i} es la pérdida de potencia entre el sensor S_j y S_i , que puede calcularse como [140]:

$$L_{S_j,S_i} = 40 + 10\gamma \log_{10} (d_{S_j,S_i}) + L_{Allowed} \quad (3.4)$$

donde γ , es el componente de dispersión; d_{S_j,S_i} es la distancia entre los sensores S_j y S_i ; y $L_{Allowed}$ la atenuación.

Para estimar la pérdida permitida $L_{Allowed}$ y el exponente de dispersión γ , para completar los cálculos en (3.4) es necesario usar los parámetros de referencia que se muestran en la Tabla 3.1 [143]. En donde se muestran valores para PÉRDIDAS PERMITIDAS (dB) que corresponden a la variable: $L_{Allowed}$; γ , COMPONENTE DE DISPERSIÓN que corresponde a la variable: γ , para los distintos casos que se presentan.

Tabla 3.1: Parámetros Ambientales Dependientes de la Aplicación [141]

APLICACIÓN	PÉRDIDAS PERMITIDAS (dB)	COMPONENTE DE DISPERSIÓN	SITIO
<i>Exterior con árboles</i>	10 a 20	3 a 4	Parque
<i>Interior paredes & pisos</i>	12-27 (pisos) 10-15 (paredes)	4 a 5	Condominio

Otra de las métricas usadas para medir el comportamiento de las WSN en el escenario propuesto es la Factibilidad. La cual permite la determinación del porcentaje de coordinadores pertenecientes a las WSN presentes, que puedan cumplir o exceder un límite de capacidad de canal previamente establecido CC_{th} . La Factibilidad está dada como porcentaje y se la mide de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$F(\%) = \frac{\text{Coordinadores con } CC_i > CC_{th}}{\text{Número Total de Coordinadores}} 100 \quad (3.5)$$

Finalmente con el fin de encontrar las equivalencias entre capacidad de canal (Kbps) y los

valores de SINR, en la Tabla 3.2 se muestra en la fila superior las velocidades de las WSN en Kbps, mientras que en la segunda fila se muestran los valores mínimos en dB que deben cumplirse para alcanzar dichas velocidades [144]. De manera que los valores en dB de SINR en un sensor puedan ser comparados usando la presente tabla, es decir que para cumplir con velocidades mayores o iguales a 250Kbps, el SINR debe ser como mínimo de 3 dB.

Tabla 3.2: SINR Mínimo para cumplir una velocidad dada en Kbps para las WSN [144]

Rb (Kbps)	250	500	1000	2000
SINR min (dB)	3	6	9	12

3.3 Análisis del Desempeño de las WSN

En el escenario de interferencias planteado y respetando las métricas presentadas previamente, se procedió a realizar dos trabajos de estudio sobre el estado de las interferencias en las WSN, que conllevan a mediciones en espacios con alta densidad de dispositivos inalámbricos. Ambos trabajos se realizaron haciendo variaciones en parámetros importantes como número de dispositivos y distancias. En el primer trabajo se puso en evidencia, por medio de simulaciones, la existencia de problemas de congestión en la banda ISM, en términos de SINR, al analizar diferentes niveles de congestión. Dentro del primer trabajo, también se propusieron dos algoritmos, con los que se pudo valorar el comportamiento de los dispositivos corriendo los algoritmos indicados. Luego en el segundo trabajo se continuó en la evaluación del desempeño de las WSN pero ahora en términos de capacidad de canal. Obteniéndose importantes conclusiones, que se describen al final del capítulo y que deben ser tomadas en cuenta en despliegues masivos de estos dispositivos, como los que existirán en ciudades futuras con todo el auge de las nuevas tecnologías.

3.3.1 Análisis de las Interferencias de las WSN en base a SINR

En este trabajo se puso en evidencia, por medio de simulaciones, la existencia de problemas de congestión en la banda ISM. Para lo cual se realizó un análisis del comportamiento de las WSN en términos de SINR, sometidas a diferentes niveles de congestión.

En el escenario dado con las consideraciones de interferencia mencionadas anteriormente, utilizando el modelo de propagación presentado también con anterioridad, se procedió a evaluar las WSN. Para lo cual se llevaron a cabo varias pruebas con la ayuda de MatLab como herramienta de simulación, partiendo de los parámetros generales del escenario indicados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros del Escenario

PARÁMETROS	VALOR
a_1	100 m
a_2	15 m
a_3, a_4	0 m
a_5	5 m
b_1	25 m
b_2	20 m
b_3	10 m
b_4, b_5	5 m
BW_Z	2 MHz
BW_W	22 MHz
$\Delta f_Z, \Delta f_W$	5 MHz
N_Z	16
N_W	11
Ruido	-120 dB

Con lo indicado anteriormente y considerando al SINR como una función para medir QoS, Se planteó los cambios paramétricos indicados en la Tabla 3.4, dando lugar a dos evaluaciones importantes, la primera analizando el estado inicial de comportamiento de las WSN, en la que adicionalmente se analizaron los comportamiento de dos algoritmos en ambientes con mayor congestión.

Para la evaluación del estado inicial se realizaron mediciones para 1000 despliegues aleatorios de parejas coordinado sensor (C→S) colocadas en la calle central del escenario, primero con, y luego sin, la presencia de AP en los edificios.

Tabla 3.4: Parámetros de Evaluación

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Número de pares de sensores	Cantidades consideradas: 5, 10, 15, 20, 25
Número de AP por piso	Cantidades consideradas: No AP, sólo en primer piso, sólo en segundo piso, solo en tercer piso, en todos los pisos
Distancia entre coordinador y sensor	Distancias consideradas: 1m, 2m y 3m
Ancho de calle	Distancias consideradas: 5m, 10m, 15m, 20m

En este caso, se analizaron tres sub-casos presentados en las siguientes tres figuras:

En la Figura 3.6, se midió el SINR para 5, 10, 15, 20 y 25 pares de sensores, manteniendo a 3m de distancia C→S y a 5 m el ancho de la calle del escenario bajo cinco niveles de interferencia: sin AP; primer piso con AP; segundo piso con AP; tercer piso con AP; y AP en los tres pisos (AP completos).

Como se puede observar en la misma figura, el SINR del escenario disminuye a medida que la cantidad de sensores aumenta para todos los casos con interferencias desde los AP. Para el caso de no interferencia desde los AP, el SINR con 5 pares de sensores es de 19.28dB y cuando se aumenta hasta 25 pares, su valor desciende a 7.55dB. Por otro lado, la interferencia de AP

según el piso en que se encuentren afecta a las WSN de manera diferente. Contrastando el SINR para 5 pares de sensores expuestos a la interferencia provocadas por diferentes pisos con AP, podemos ver que el primer piso es el que más afecta a las WSN, mientras que la afectación del tercer piso parece ser insignificante. Por otro lado cuando se considera la mayor interferencia desde los AP, con dispositivos AP colocados en cada piso y departamento, las mediciones del SINR son muy similares a las de las mediciones obtenidas colocando AP en sólo por el primer piso.

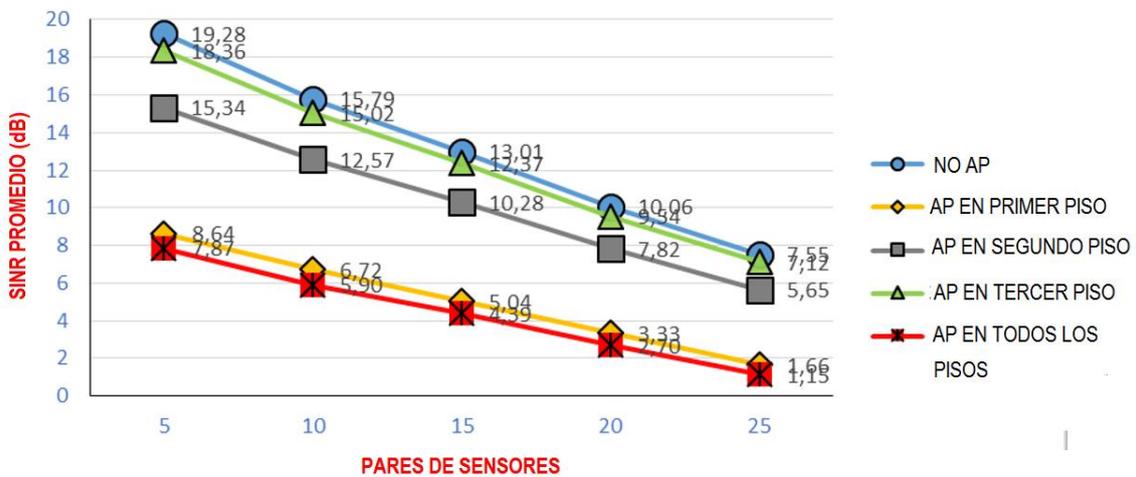


Figura 3.6 SINR vs Pares de Sensores para Distancia C→S de 3m, Ancho de Calle de 5m e Interferencia AP Variable

En la Figura 3.7, se mide el SINR para 5, 10, 15, 20 y 25 pares sensores, con AP en los tres pisos (AP completos), para un ancho de calle de 5 m y considerando distancias C→S de 1, 2 y 3 m. Como podemos ver para el caso de 5 pares de sensores, la distancia entre sensores afecta el SINR del escenario: 38.29dB por 1m, 19.29dB por 2m y 7.87dB para 3m. Como los sensores tienen más separación entre ellos, la potencia recibida es menor prevaleciendo la interferencia y reduciendo los niveles de SINR.

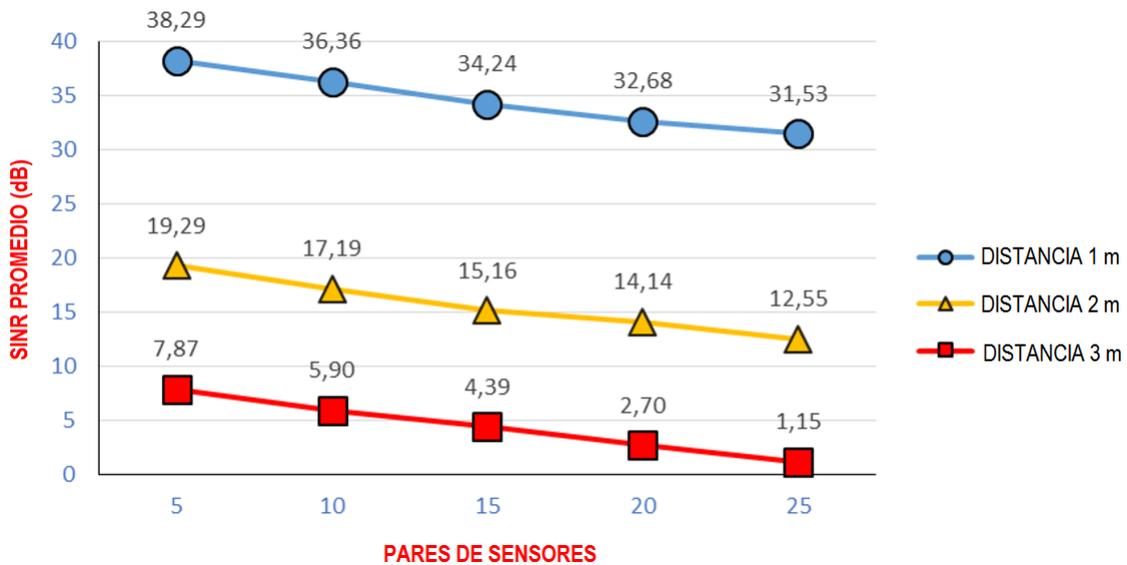


Figura 3.7. SINR vs Número de pares de Sensores con Plena Interferencia de AP, Ancho de Calle de 5m y Distancia entre Sensores Variable

En la Figura 3.8, se mide el SINR para 5, 10, 15, 20 y 25 pares sensores, manteniendo AP en los tres pisos (AP completos) y la distancia $C \rightarrow S$ de 3 m, que varía el ancho de la calle de 5 a 10, 15 y 20m. Se puede ver que para el caso de 5 pares de sensores, el ancho de la calle influye en el SINR del escenario: 7.87dB para 5m, 11.55dB para 10m, 13.90dB para 15m y 15.56dB para 20m.

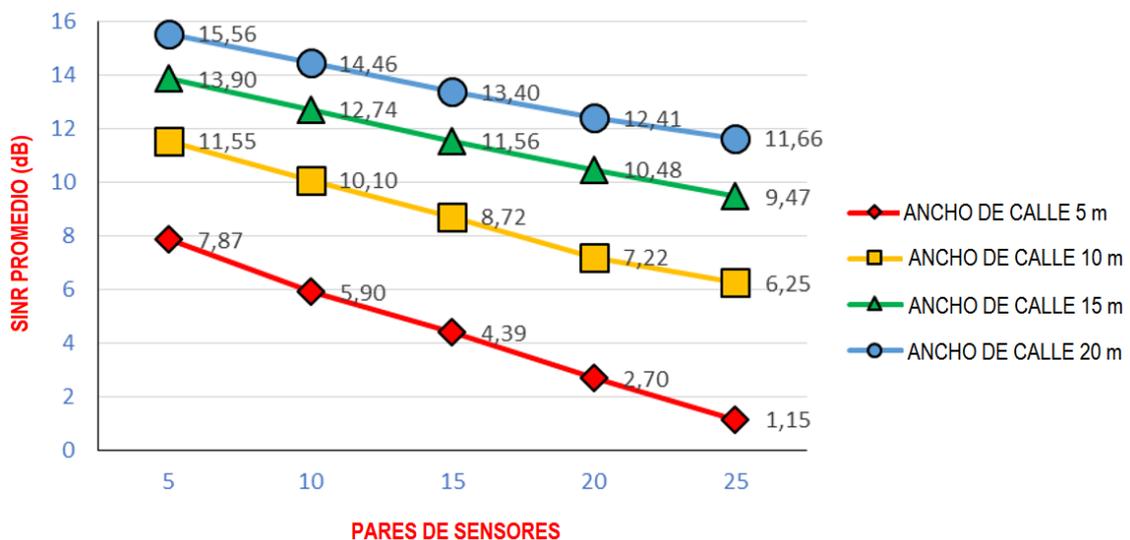


Figura 3.8. SINR vs Número de Pares de Sensores con Plena Interferencia de AP, Distancia entre Sensores de 3m y Ancho de Calle Variable

Mientras más ancha sea el ancho de la calle, los pares de sensores tendrán más espacio para ejecutar su trabajo lejos de otros sensores y con menor interferencia de AP, permitiendo que los niveles de SINR crezcan.

Como ya se indicó, en este Estudio, se desarrollaron además, dos algoritmos de optimización, uno Egoísta y otro Altruista que mejoran la respuesta de los dispositivos.

El algoritmo Egoísta utiliza un procedimiento centralizado, donde todos los canales son seleccionados por un ente central para cada par de sensores. El canal que proporcione el mejor SINR para un par de sensores será el seleccionado. Esta operación se repite para cada par de sensores. Dando como resultado una selección Egoísta de canales debido al hecho de que no le importa el SINR de los otros pares de sensores. La Figura 3.9 muestra el pseudocódigo correspondiente.

```
1 Set  $S_0, Ch_0$ ; Asignación de canales iniciales a sensores
2 for  $S_i = 1:n$ ; Corra para todos los sensores
3   for  $Ch_i = 1:26$ ; Corre para todos los canales
4   Calcule SINR para todos los sensores
5     if  $SINR(S_i(Ch_i)) > SINR(S_0, (Ch_0))$ ; seleccione el canal
6        $S_0, (Ch_0) = S_i(Ch_i)$ ; Actualice el canal
7     end;
8   end;
9 end;
```

Figura 3.9. Seudocódigo de Algoritmo Egoísta

En el algoritmo Altruista, un canal es seleccionado para cada par de sensores, midiéndose la contribución al SINR del resto de los sensores y agregándose este valor a una suma parcial, esto se repite para todos los canales y seleccionándose aquel que proporcione la mejor adición de SINR. Este procedimiento se repite para cada par de sensores. A este algoritmo se lo conoce como algoritmo Altruista debido al hecho de que se preocupa por el rendimiento general de la red. La Figura 3.10 muestra el correspondiente pseudocódigo.

```

1  Set  $S_0, Ch_0$ ; Asignación de canales iniciales a sensores
2  Calcule SINR para todos los sensores
3  Calcule la función SINR SUM para los valores iniciales de SINR de todos los sensores
4  for  $S_i = 1:n$ ; Corra para todos los sensores
5      for  $Ch_i=1:26$ ; Corra para todos los canales
6          Calcule el SINR para todos los sensores
7          Calcule la función SINR SUM para todos los sensores
8              if  $SINR\_SUM\_i > SINR\_SUM\_0$ ; escoja los canales
9                   $S_0, (Ch_0) = S_i(Ch_i)$ ; Actualiza el canal
10             end;
11     end;
12 end;

```

Figura 3.10. Seudocódigo de Algoritmo Altruista

Las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13 comparan en una sola gráfica el desempeño de los algoritmos Egoísta y Altruista con el Estado Inicial encontrado en el Caso de Estudio I.

En la Figura 3.11, se mide el SINR para 5, 10, 15, 20 y 25 pares de sensores, manteniendo AP en los tres pisos (AP completos), un ancho de calle de 5m y una distancia $C \rightarrow S$ de 2 metros. Como podemos ver, para el caso de 5 pares de sensores, ambos algoritmos permiten optimizar su SINR de 19.63dB a 24.22dB para el algoritmo Altruista y a 28.07dB para el Egoísta. Estos márgenes de optimización se mantienen a medida que se aumenta la cantidad de pares de sensores de 5 a 25.

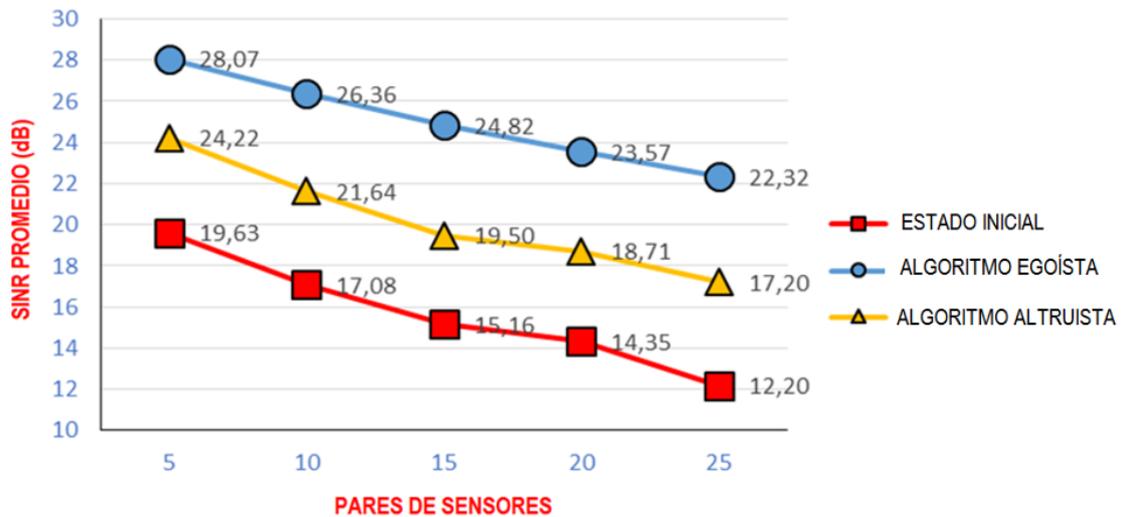


Figura 3.11. SINR vs Número de Pares de Sensores con Plena Interferencia de AP, Distancia entre Sensores de 2m y Ancho de Calle de 3m

Las Figuras 3.12 y 3.13 ilustran el comportamiento de los SINR de los sensores cuando las distancia entre ellos y el ancho de la calle varía. En los gráficos puede apreciarse claramente que ambos algoritmos permiten que el SINR de los sensores sean más altos que en el Estado Inicial. Alcanzando el algoritmo Altruista aproximadamente 5dB más y el Egoísta 10dB.

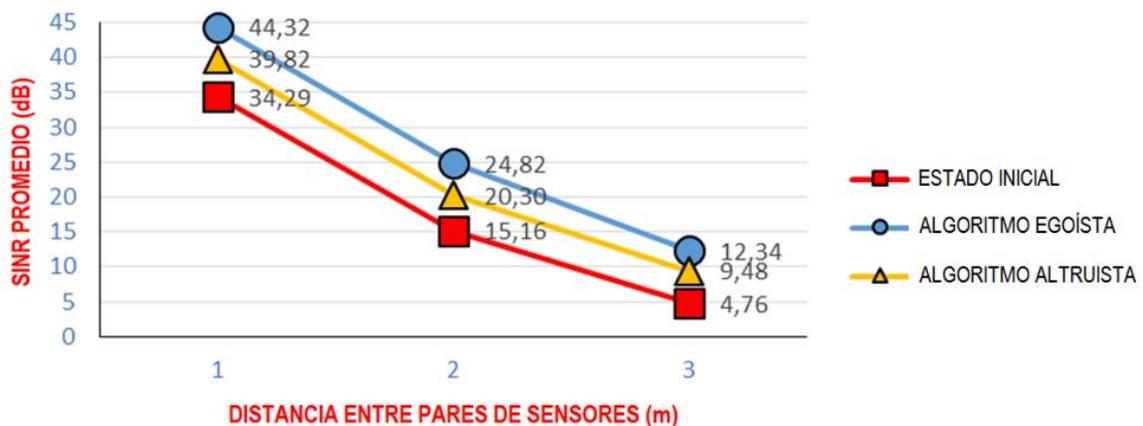


Figura 3.12. SINR vs Distancia entre Sensores (para 15 Pares) de 1, 2 y 3m con Plena Interferencia de AP y Ancho de Calle de 5m

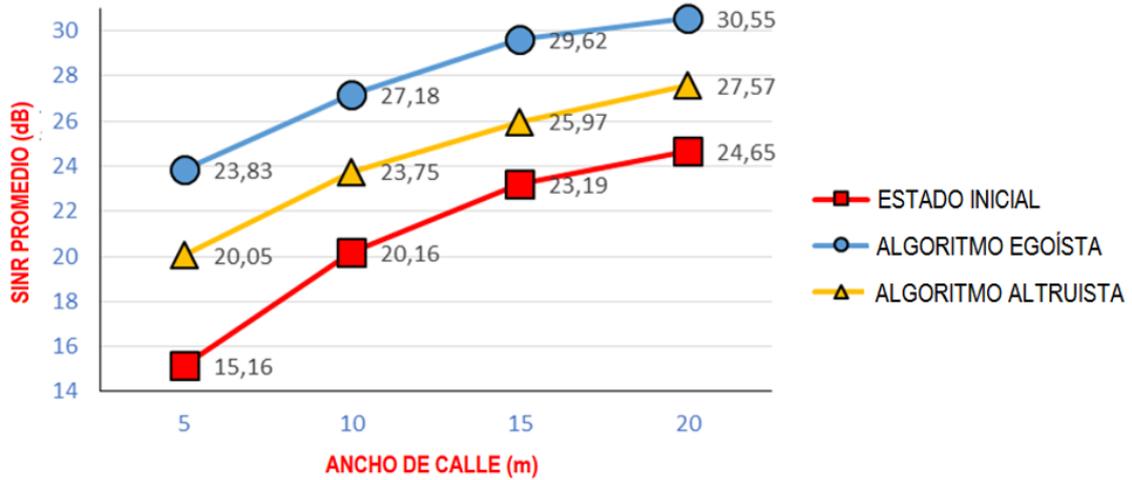


Figura 3.13. SINR vs Ancho de Calle de 5, 10, 15 y 20m con 15 Pares de Sensores, Plena Interferencia de AP y Distancia entre Sensores de 2m

3.3.2 Análisis de las Interferencias de las WSN en base a Capacidad de Canal

Tomando en cuenta las métricas establecidas y el escenario propuesto, se realizaron nuevas evaluaciones del comportamiento de las SINR pero ahora en base a capacidad de canal, considerando, obteniendo los siguientes resultados:

En las Figura 3.14 se muestra la Factibilidad vs variado número de Pares de Sensores (2,4,..18) sin la presencia de AP y con una distancia entre C→S de 3m. En tal forma que al aumentar el número de pares de sensores, la factibilidad disminuye debido a la interferencia entre vecinos. Además el comportamiento de la Factibilidad para las velocidades de 250Kbps y 500Kbps es muy similar, sufriendo una reducción de un 30% para el caso de 18 pares de sensores en el escenario.

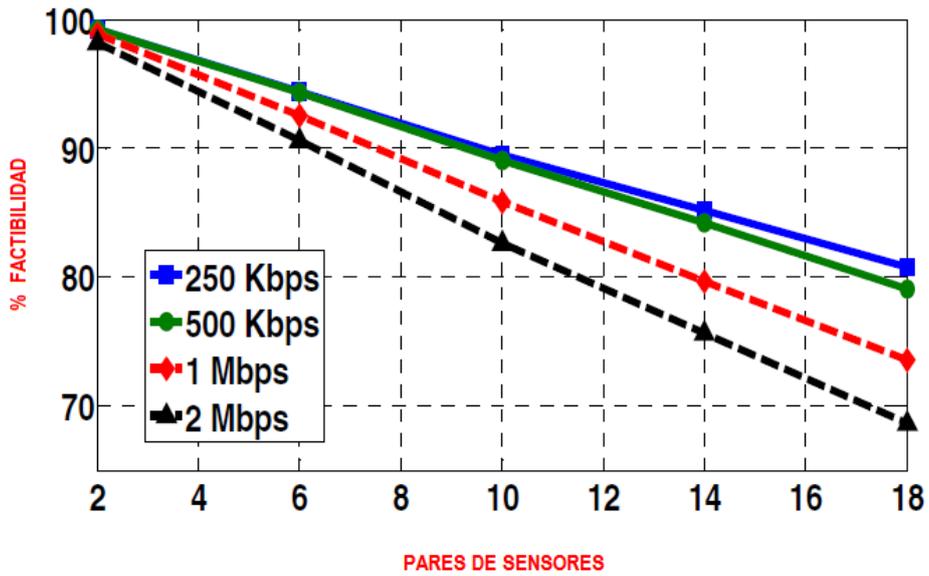


Figura 3.14 Factibilidad sin AP

En la Figura 3.15, se analiza en un escenario interferido con variados números de AP. Para esto, se mide la Factibilidad vs el número de dispositivos AP en un escenario que contiene 10 pares de sensores. A velocidades de 250 Kbps la disminución de la Factibilidad es apenas de 1%, desde un 88% sin AP a 87% para 100 AP. Estas medidas para 100 AP y velocidades de 500Kbps, 1000Kbps y 2000Kbps experimenta serias disminuciones de Factibilidad llegando hasta un 60% para (caso de 2000Kbps), lo cual es inviable.

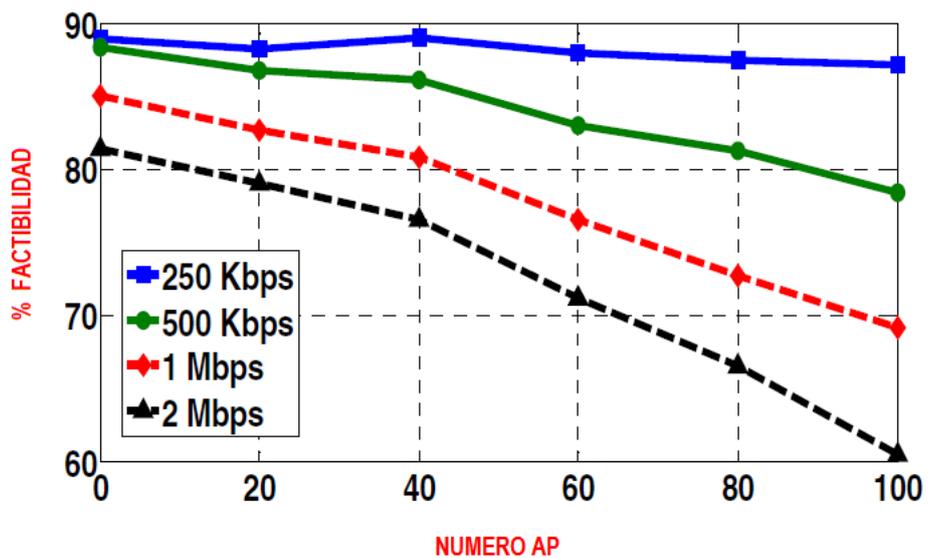


Figura 3.15 Factibilidad con 10 AP

Finalmente, en la Figura 3.16 se analiza el efecto sobre la Factibilidad de la distancia entre C-S. En este caso, el escenario se configuró con 10 pares sensores y 40 AP. Para una velocidad de 250Kbps empezando con distancias de 1m entre C→S hasta los 12m, la disminución de Factibilidad es marcada de casi 100% baja a un 36%. Para el resto de velocidades las pérdidas son aún mayores.

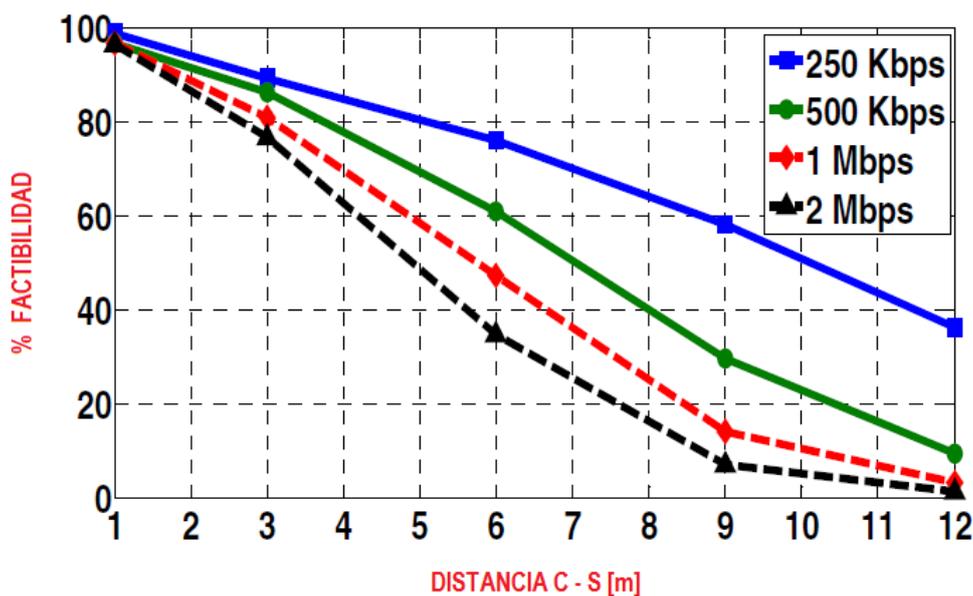


Figura 3.16 Factibilidad con 10 sensores y 40 AP

3.4 Conclusiones

En el Primer Trabajo de Investigación, se presentó la evaluación de desempeño del comportamiento de las WSN en un escenario urbano denso mediante un estudio de interferencias entre las WSN y las WLAN en base a SINR, encontrándose situaciones insostenibles, que con la tendencia actual continuarán complicándose aún más. Los despliegues de WSN podrían estar sujetos a graves interferencias causadas por la presencia de otros WSN en la calle central o por AP ubicado en los edificios laterales del escenario. En dichas mediciones se consideraron números variados de pares de sensores, con también variado número de AP colocados a diferentes distancias, en donde podía variarse además el ancho de la

calle central. Con esta comprobación de la existencia de serias interferencia en los escenarios indicados, se procedió a complementar este trabajo proponiendo dos algoritmos, uno Egoísta y otro Altruista que contribuirían a la mitigación de interferencias. Luego de su aplicación se demostró que los dos algoritmos mejoran la relación SINR de sus coordinadores en comparación con los obtenidos en el Estado Inicial. Para el caso del algoritmo Egoísta su mejor comportamiento prácticamente duplicó al del algoritmo Altruista.

En el Segundo Trabajo de Investigación ante la gran posibilidad de tener un futuro cercano con interferencias aún más severas que las anteriores, se realizaron mediciones en base a Capacidad de Canal y Factibilidad. Parámetros que permitieron evaluar la QoS de la red, mediante tres escenarios. El primero presentado en la Fig. 5 donde se considera un escenario sin la interferencia de AP en el que se observa la interferencia cocanal entre las WSN, mostrando una clara afectación de su Factibilidad. En un segundo escenario se evalúa la Factibilidad sobre 10 pares de sensores con la presencia incremental de AP; observando que para 250Kbps, la afectación podría desestimarse pero a mayores velocidades 500Kbps, 100Kbps y 2000Kbps son considerables. Finalmente se analiza un escenario con 10 pares de sensores y diversas distancias entre C→S y 40 AP como interferencia. Demostrándose con estos casos que las WSN en escenarios muy densos pueden ser gravemente afectadas, ya sea por masivos despliegues de otras WSN o de AP. Concluyendo que el problema de interferencias es un problema crítico y que debe ser tomado muy en cuenta para el desarrollo de mecanismos futuros tendientes a mantener una determinada QoS en las redes inalámbricas.

Capítulo 4.

Mecanismos de Asignación de Canales en WSN Usando Banda ISM

Los mecanismos de asignación de canales siguen siendo fundamentales en la solución del tema de interferencias. En este estudio en específico se trata de la aplicación de estas técnicas a casos de extrema congestión que ocurrirán en un futuro cercano dentro de espacios urbanos de alta densidad. Esto como consecuencia del auge de la tecnología y el desarrollo de grandes ciudades inteligentes y del IoT con la interconectividad de objetos y cosas.

Con el escenario propuesto, más las métricas e interferencias señaladas en el capítulo anterior, ante la inminencia de un futuro de congestiones extremas, se procedió a proponer un nuevo mecanismo de selección de canales basado en un algoritmo Heurístico. El mismo que empleando muy pocos recursos computacionales, permite maximizar entre los coordinadores del escenario máximos valores de capacidad de canal en ambientes de alta congestión de dispositivos en la banda ISM. El algoritmo Heurístico es comparado operacionalmente con un algoritmo Óptimo desarrollado también en este documento y que es utilizado como benchmarking.

Para esta investigación se consideró imperativo el análisis de futuros escenarios sometidos a capacidades extremas evaluando sus límites operacionales, con el propósito de encontrar mecanismos apropiados que permitan a las WSN sobreponerse a restricciones de interferencia en escenarios futuros. Para lo cual se dividió el trabajo en dos partes: 1) Análisis del Comportamiento de las WSN en Bandas ISM Congestionadas, que completa el trabajo iniciado en el capítulo anterior y 2) Mecanismos de Asignación de Canales, en esta parte que se proponen los nuevos algoritmos.

4.1 Análisis del Comportamiento de las WSN en Bandas ISM Congestionadas

Para analizar el rendimiento de las WSN, despliegues uniformes de WSN fueron colocados en la calle central del escenario propuesto, y los dispositivos WLAN fueron representados por AP ubicados dentro de cada apartamento de los edificios laterales. Cada piso que contiene AP podría habilitarse o deshabilitarse, para permitir varios niveles de interferencia sobre las WSN.

Antes de comenzar con el análisis indicado, es necesario conocer los parámetros del escenario para dispositivos WSN y AP de la banda ISM de 2.4 GHz, que son $a_1 = 5\text{ m}$; $a_2 = 15\text{ m}$; $b_1 = 10\text{ m}$; $b_2 = 15\text{ m}$; $b_3 = 10\text{ m}$; $PIRE_{WSN} = +10\text{ dBm}$; $BW_z = 2\text{ MHz}$; $\Delta f_z = 5\text{ MHz}$; $BW_w = 22\text{ MHz}$; $\Delta f_w = 5\text{ MHz}$; Nivel de ruido = -120 dBm , $PIRE_{AP} = +30\text{ dBm}$. Los cuales se utilizaron en simulaciones realizadas con el software MatLab, en computadoras con procesador Intel Core I7 3.4GHz y 8 GB de RAM.

En la Figura 4.1, se muestra la capacidad del canal promedio vs el número de pares de sensores, y se observan los siguientes casos: primero, el caso de interferencia menos restrictivo que es cuando las WSN está sujetas solo a la interferencia cocanal entre ellas, una situación mostrada por la curva CC_WSN; el segundo caso es cuando la interferencia de los AP ubicados en la planta baja de los edificios se agrega a la interferencia cocanal, que se muestra en la curva CC_WSN AP + 1. Finalmente, el nivel más restrictivo es cuando la interferencia cocanal de las WSN se ve afectada adicionalmente por la interferencia de los AP del primer y segundo piso, situación señalada por la curva CC_WSN AP + 2.

El impacto de estas interferencias es visible en la misma figura ya que a medida que aumenta el número de sensores en el escenario, se observa una disminución notable en la capacidad de canal promedio para los tres casos indicados. Así, por ejemplo, para CC-WSN, se puede ver que, al aumentar de 10 a 50 pares de sensores en el escenario, la capacidad del canal se reduce en aproximadamente un 48,39%. Por otro lado, es posible observar que la influencia de los AP del primer piso (CC_WSN AP + 1) es decisiva en el cálculo de la capacidad del canal. Los AP a nivel de la calle, causan una mayor interferencia en WSN que aquellos en el primer piso, debido a su proximidad.

Es posible observar que el efecto causado por los AP ubicados en el segundo piso disminuye la capacidad del canal en una cantidad muy pequeña en comparación con la afectación causada por aquellos en el suelo y el primer piso. Dado que los AP en el segundo piso (CC_WSN AP + 2) están más lejos que los del primer piso, sus pérdidas de propagación son mayores, lo que resulta en reducciones de interferencia considerables en comparación con la causada por los AP del primer piso o de la planta baja.

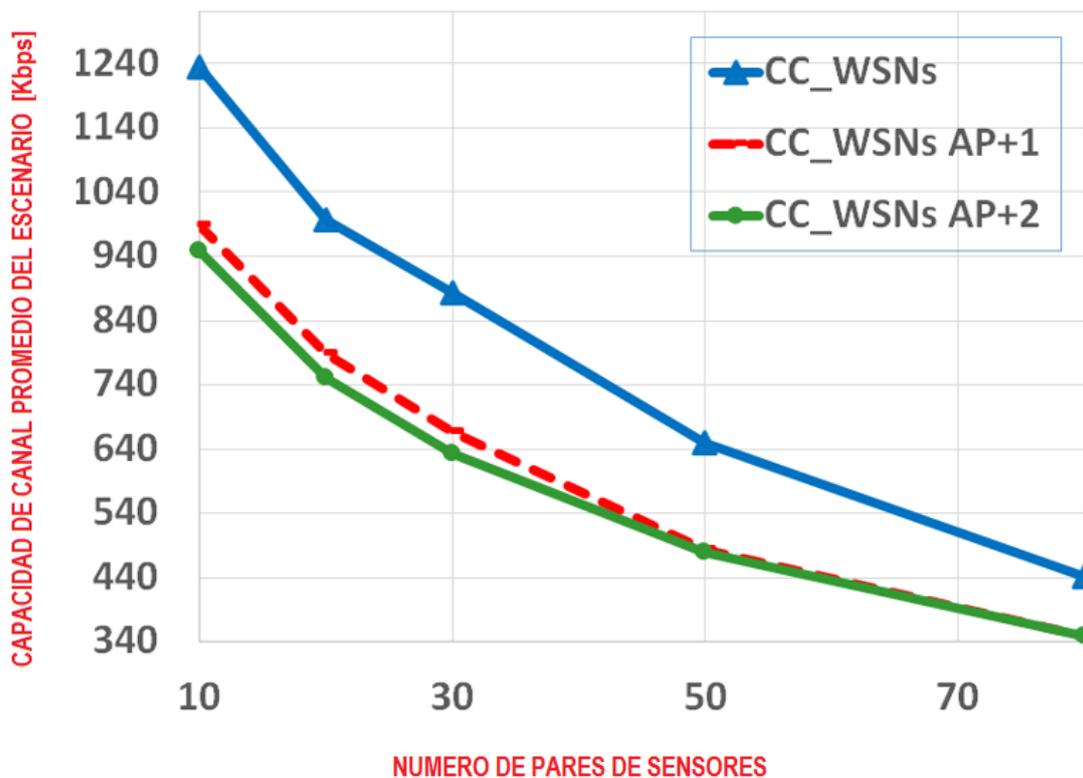


Figura 4.1 Capacidad de canal Promedio vs Número de Pares de Sensores para Diferentes Niveles de Interferencia

En la Figura 4.2 se muestra la Factibilidad vs el número de pares de sensores. El concepto de Factibilidad se define en (3) y se utiliza para resaltar el porcentaje de WSN que iguala o supera un umbral $CC_{th} = 250$ Kbps. Se ha calculado la Factibilidad, para los tres casos de interferencia indicados, considerando cantidades crecientes de pares de sensores desplegados en cada caso.

El mismo gráfico muestra que con la presencia de solo interferencia cocanal (CC_WSN) considerando 10 pares de sensores en el escenario, aproximadamente el 90% de los sensores alcanzan una capacidad de canal superior a 250 Kbps, es decir, su Factibilidad en este El punto es 90%. Sin embargo, a medida que aumenta el número de pares de sensores, se obtiene una disminución drástica en la Factibilidad. Observando que con 20 pares de sensores, el porcentaje de factibilidad disminuye al 80%, lo que significa que el 20% de los dispositivos no funcionan correctamente. Mientras que, en el caso de 80 pares de sensores, la viabilidad cae a un valor inviable del 45%.

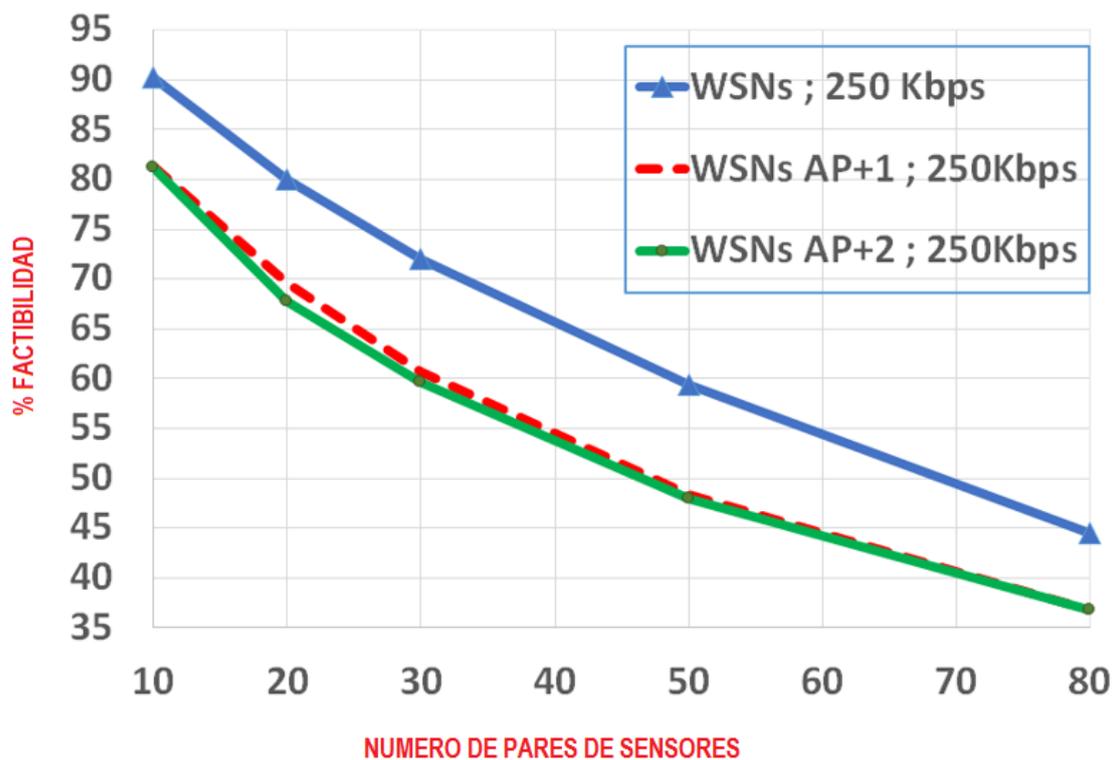


Figura 4.2 Factibilidad vs Número de Pares de Sensores para Diferentes Niveles de Interferencia

Al incluir la interferencia de los AP colocados tanto en el primer (CC_WSN AP + 1) como en el segundo piso del escenario (CC_WSN AP + 2), la Factibilidad sufre un deterioro adicional de aproximadamente el 10%, alcanzando el 80% de Factibilidad para 10 pares de sensores , y 37% para 80 pares. Nótese en el gráfico, una afectación marginal causada por AP adicionales colocados en el segundo piso de los edificios observando las curvas WSN AP + 1 y WSN AP + 2, con una pequeña diferencia entre ellas.

El resultado de este análisis demuestra que, sin mecanismos de asignación de canales, el rendimiento de las WSN se reduce drásticamente a medida que aumenta el número de pares de sensores produciendo incrementos descontrolados de interferencia. Considerando la Factibilidad del 80% como un rendimiento aceptable para un cierto umbral, sin mecanismos de asignación de canales, las WSN están limitadas a un máximo de 20 pares de sensores en el escenario propuesto. Constituyendo una fuerte restricción al crecimiento de las WSN y reafirmando el hecho de que el desarrollo y uso de mecanismos de asignación de canales para

mitigar los efectos de las interferencias es imperativo.

4.2 Mecanismos de Asignación de Canales

En este subcapítulo se describen los algoritmos propuestos, indicando en primer lugar la Formulación Matemática que sustenta el problema, para luego describir el Mecanismo de Solución Óptima usado como benchmarking. Para luego continuar con la descripción del Mecanismo de Solución Heurística, para continuar con la descripción de la obtención del Mejor Canal para el Mecanismo Heurístico Propuesto.

4.2.1 Formulación Matemática

El set de valores $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ representa N pares de sensores con $C_i \forall i \in (1, 2, 3, \dots, N)$. El set de valores $AP = \{AP_1, AP_2, AP_3, \dots, AP_K\}$ representa K AP con $AP_l \forall l \in (1, 2, 3, \dots, K)$. El set de valores $CC = \{CC_1, CC_2, CC_3, \dots, CC_N\}$ representa la capacidad de canal de N coordinadores con $CC_i \forall i \in (1, 2, 3, \dots, N)$. El set de valores $Ch = (Ch_1, Ch_2, Ch_3, \dots, Ch_M)$ representa N canales posibles con $Ch_j \forall j \in (1, 2, 3, \dots, M)$.

Los mecanismos recomendados comparan su capacidad de canal, calculada con (3.2), con el CC_{TH} previamente definido, para determinar los dispositivos factibles utilizando (3.3), es decir, el porcentaje de aquellos que cumplen con la restricción impuesta por dicho umbral.

Con esta formulación, es posible seleccionar una función de utilidad que permita la evaluación del desempeño de la capacidad de canal de cada coordinador [27].

$$u_{i,j} = \begin{cases} 1 - (1 - q) \cdot e^{-S(CC_{ij} - CC_{TH})}; & CC_i > CC_{TH} \\ q \cdot e^{S(CC_{ij} - CC_{TH})} & ; \text{ otros casos} \end{cases} \quad (4.1)$$

Esta ecuación es una función sigmoidea con valores entre cero y uno, que compara los valores de capacidad del canal utilizados con el umbral CC_{TH} y los transforma en valores de utilidad, que podrían ser mayores que 0.5 y menores que 1 para los coordinadores que exceden CC_{TH} , y en valores inferiores a 0.5 mayor que -1 cuando están por debajo del umbral. En caso de coincidencia con el umbral, recibe un valor de 0.5. Por lo tanto, $u_{i,j}$ indica la utilidad del coordinador i trabajando en el canal j ; CC_{ij} es la capacidad del canal del coordinador i que trabaja en el canal j ; CC_{TH} es la capacidad del canal umbral; q es una variable equivalente al umbral, y S es la pendiente de la curva sigmoidea.

Después de encontrar la utilidad que tiene cada coordinador, utilizando los canales asignados, es necesario obtener el desempeño de todos los coordinadores. Para esto, se calcula la suma total de la utilidad U_T de cada coordinador en los canales de operación seleccionados:

$$U_T = \sum_{i=1}^N u_{i,j} \quad (4.2)$$

La representación del rendimiento general de la red de sensores es el valor que debe maximizarse (4.3) para obtener la asignación adecuada que permita alcanzar el mayor número posible de coordinadores por encima del umbral:

$$\text{Maximizar } U_T \quad (4.3)$$

s.t.

- a) Los coordinadores $C(i)$ pueden hacer uso de un canal WSN al momento.
- b) Los puntos de acceso AP(l), pueden hacer uso de un canal WLAN a la vez.

4.3 Descripción del Mecanismo de Solución Óptimo

La solución óptima se desarrolló a partir de un mecanismo centralizado que utiliza una adaptación modificada de una estrategia de optimización bien conocida por la comunidad científica como es el Simulated Annealing (SA) [64]. En cada iteración, el algoritmo intenta acercarse al resultado óptimo, de tal manera que cuanto mayor sea el número de iteraciones, más cercano al óptimo estará. Las soluciones utilizadas en este trabajo como benchmarking se obtuvieron mediante 30,000.00 iteraciones del algoritmo.

Una vez que el algoritmo se ajusta definiendo los parámetros necesarios para obtener resultados óptimos (T_0 , CR y ϵ), se lo carga en una entidad central que es responsable de ejecutarlo periódicamente, permitiendo que cada coordinador elija su canal operativo óptimo a través de un proceso iterativo, que usa la función de utilidad definida en (4.2). Todo esto con el objetivo final de maximizar la suma total de ganancias y alcanzar las capacidades de canal más altas para todos los coordinadores de la red.

El pseudocódigo para este algoritmo se muestra en la Figura 4.3 y funciona de la siguiente manera: para cada coordinador C_i , se realiza una selección de asignación de canal aleatorio inicial seleccionando canales operativos iniciales. Además, se establecen algunos parámetros SA, como la temperatura T en el valor inicial T_0 , que disminuye con cada iteración, reduciendo

la probabilidad de un cambio de canal; la velocidad de enfriamiento (C_r), que es un factor utilizado para reducir la temperatura durante cada iteración; y, la constante predefinida ϵ que se utiliza para la selección de canales probabilísticos (línea: 1). Luego, se inicializa la aplicación del algoritmo en el coordinador 1 (línea: 2). El algoritmo comienza a ejecutarse de forma iterativa utilizando un ciclo while, en el que se evalúan varios criterios de detención, como T_{min} , que es la temperatura mínima que se puede alcanzar; N_{max} , que es el número máximo de iteraciones alcanzables; o, cuando se alcanza el valor de convergencia Q (línea: 3). Se elige el coordinador C_i (línea: 4). En este momento comienza el proceso de selección de un nuevo canal operativo j , y se conoce como el canal candidato (línea: 5).

```

Datos:    Temperatura  $T_0$ ,  $C_r$ ,  $\epsilon$ ,  $C_i$ ,  $N_{i_{max}}$ ,  $T_{min}$ ,  $Ch_j$ 
Resultado:    maximizar  $[\sum_{i=1}^N u_{i,j}]$ 

1  Seleccione  $T=T_0$ ,  $C_r$ ,  $\epsilon$ ,  $C_i$ ,  $N_{max}$ ,  $T_{min}$ 
2  Empezando con  $i=1$ 
3  while no se alcance criterio de parada Verifique
    ; If  $N_{max}$ ,  $T_{min}$  o convergencia es alcanzada
4   $C_i$ ; Coordinador  $i$  es escogido
5  Obtenga un nuevo canal candidato  $j$ : for  $C_{i,j}$ 
6  Compute  $\delta = U(i) - U(j)$ 
7  if  $\delta < 0$  then
8   $i=j$ 
9  elseif  $\delta > 0$ 
10 if aleatorio  $[0,1] \leq e^{-(\delta T)}$  then
11  $i=j$ 
12 end (10)
13 elseif  $\delta = 0$  then
14 if aleatorio  $[0,1] \leq e^{-(\epsilon/T)}$  then
15  $i=j$ 
16 end (14)
17 end (7)
18 Añada  $C_{i,j}$  a matriz de resultados
19 Actualice  $T = C_r \cdot T$  y el número de iteraciones  $N_i$ 
20 If  $i=N$  then
21  $i=1$ 
22 end (20)
23 end (3)

```

Figura 4. 3 Seudocódigo para el Mecanismo Óptimo Utilizado como

Benchmarking

Para la elección del canal candidato del coordinador seleccionado, se evalúan las utilidades producidas con cada uno de los canales disponibles; mientras que el resto de los coordinadores mantienen sus canales operativos iniciales; procediendo luego, a la evaluación de la suma de utilidades correspondiente a cada canal. Con estas sumas de utilidades, se realiza una selección probabilística de un valor de utilidad que corresponderá a un canal de operación que será el canal candidato seleccionado; luego continúe con el siguiente paso del algoritmo.

En el siguiente paso, la decisión de mantener el canal actual o cambiar a un nuevo canal candidato depende de una comparación de las utilidades obtenidas con el nuevo canal. Entonces, si $U(i)$ es su utilidad utilizando el canal actual i y $U(j)$, la utilidad con el nuevo canal j ; se aceptará el nuevo canal, siempre que $\delta = U(i) - U(j) < 0$ (línea: 6-8). Sin embargo, si el canal candidato disminuye el valor de la utilidad, puede aceptarse, con una probabilidad que depende de la magnitud del cambio y la temperatura de operación T . La probabilidad mencionada viene dada por $Pr[\delta, T] = e^{-\delta/T}$ (línea: 9-12). Por otro lado, si las utilidades son iguales, el cambio será aceptado con una probabilidad que depende de la constante predefinida ϵ y la temperatura T , $Pr[\epsilon, T] = e^{-\epsilon/T}$ (línea: 13 -16).

De lo contrario, si ninguna de las dos últimas condiciones es verdadera, el algoritmo no acepta el canal candidato. Una vez que se toma la decisión sobre el nuevo canal, la matriz C_{ij} actualiza sus valores manteniendo las asignaciones de canal j para cada coordinador C_i (línea: 18). El C_r se usa para multiplicar la temperatura T del algoritmo, de modo que su valor disminuya en cada iteración mientras disminuye la probabilidad de aceptación de un nuevo canal (línea: 19). La repetición de las operaciones que comenzaron con el ciclo while continuará hasta que todos los N coordinadores obtengan una asignación de canal. Está claro que, a través de este proceso estocástico, el algoritmo evita quedar atrapado en un óptimo local (líneas: 20-22). El código final, en la última línea, cierra el ciclo while (línea: 23).

4.4 Descripción del Mecanismo Heurístico Propuesto

El seudocódigo utilizado para el mecanismo heurístico propuesto, que llamamos Max, se expresa en la Figura 4.4. Este mecanismo se basa en el algoritmo conocido como “El Mejor Primero” (“Best First”) [145], que busca maximizar el valor de utilidad total de los sensores en la red mediante la asignación de canales a los coordinadores. La explicación detallada del pseudocódigo es la siguiente: al principio, se asignan canales aleatorios a todos los coordinadores (línea: 1); se inicia un lazo while, verificando si se ha cumplido el número máximo de iteraciones o si se han alcanzado los criterios de convergencia (línea: 2); se selecciona el primer coordinador que se evaluará (línea: 3); se selecciona el mejor canal,

mediante un procedimiento especial indicado en la siguiente subsección (línea: 4); el canal resultante para el coordinador en cuestión se agrega a una matriz de resultados (línea: 5); se actualiza el número de iteraciones (línea: 6). se determina si todos los coordinadores de N han sido evaluados (línea: 7); si esto es verdadero, $i = 1$ y se comienza de nuevo con el primer coordinador (línea: 8); por último si la condición termina (línea: 9); indica la finalización del lazo while siempre cuando no se cumplan los criterios de detención (línea: 10).

<p>Datos: $C_i, N_{i_{max}}, Ch_j$</p> <p>Resultado: $maximizar[\sum_{i=1}^N u_{i,j}]$</p> <p>1 se seleccionan canales iniciales aleatorios para ; cada coordinador</p> <p>2 while se alcance el criterio de parada ; Verifique si N_{max} es alcanzado o si ; el criterio de convergencia es alcanzado</p> <p>3 C_i; Coordinador i es seleccionado</p> <p>4 “selección del mejor canal” j para C_i</p> <p>4 Añada $C_{i,j}$ a la matriz de resultados</p> <p>6 Actualice el número de iteraciones N_i</p> <p>7 If $i=N$ then</p> <p>8 $i=1$</p> <p>9 end (7)</p> <p>10 end (3)</p>
--

Figura 4. 4: Seudocódigo del Mecanismo Heurístico Propuesto Max

4.4.1 Mejor Canal del Algoritmo Heurístico Propuesto

El mejor canal se refiere a la selección de un canal candidato para un coordinador particular, mientras que el resto de los canales asignados permanece sin cambios, para permitir incrementos en el valor de utilidad total.

Para escoger el mejor canal candidato, se hace una asignación inicial aleatoria de canales para los coordinadores del escenario. Luego se empieza con el coordinador 1 y se evalúan sus utilidades para cada uno de los M canales disponibles; se escoge el canal que presenta la máxima

utilidad y se lo guarda como canal candidato asignado al coordinador uno. Se continúa con el siguiente coordinador y se procede en igual forma al caso anterior hasta completar de asignar canales a todos los coordinadores. En tal forma que al final del ciclo, cada coordinador C_i tendrá un canal candidato Ch_j que le proporcione la máxima utilidad.

Lo anterior para el caso de N coordinadores y M canales, se puede representar como una operación de asignación secuencial, en la que al final se tendrá asignado para cada coordinador:

$$C_i \leftarrow \text{Canal con máxima utilidad } u_{i,j} ; i = (1, \dots, N); j = (1, \dots, M)$$

A medida que el algoritmo continúa, en cada iteración, se aproxima a una mejor solución global. El algoritmo se detiene cuando alcanza un estado de convergencia o alcanza un cierto número de iteraciones.

4.5 Evaluación del Desempeño de los Mecanismos

Esta sección evalúa el desempeño de los mecanismos propuestos en este Capítulo, a través de simulaciones considerando el escenario modelado en el Capítulo III.

4.5.1 Configuración de la Simulación

Esto se hace con el uso de MatLab como herramienta de software, en computadoras Hewlett Packard Intel Core I7, 3.4GHz y 8GB de RAM para dispositivos WSN y AP de la banda ISM de 2.4GHz.

Cantidades cada vez más numerosas de pares de WSN se colocan aleatoriamente en la calle central del escenario, sujeto a diferentes niveles de interferencias. Debido no sólo a la interferencia cocanal de otros WSN, sino también debido a AP ubicados dentro de los edificios simulando incluso las peores condiciones. Los cálculos de potencia se realizan considerando las pérdidas de propagación para cada dispositivo. Las curvas se obtienen promediando los valores de al menos 100 escenarios aleatorios.

4.5.2 Parámetros de Configuración

Los parámetros utilizados por el algoritmo OPTIMUM se describen a continuación: $C_r = 0.7$; $q = 0.5$; pendiente de utilidad $S = 35$; $T_{min} = 1 \times 10^{-5}$; número de canales WSN = 16; número de canales WLAN = 11; número máximo de iteraciones $N_{max} = 30000$; $\epsilon = 1 \times 10^{-1}$. Los

parámetros utilizados por el algoritmo Max son: $q = 0.5$; $S = 35$; número de canales WSN = 16; número de canales WLAN = 11; Número máximo de iteraciones $N_{max} = 300$.

4.6 Resultados de la Simulación

Para la evaluación de los mecanismos propuestos, se utilizó un escenario con una asignación de canal aleatorio como referencia inicial, que a partir de ahora se denominará REF.

En la Figura 4.5 (a), se muestran las curvas de capacidad de canal promedio en Kbps, para los mecanismos OPTIMUM y Max, junto con la curva de referencia REF, más una curva de capacidad del canal que se aplica al escenario la asignación de canal utilizada por el Estándar 802.15.4 para redes de sensores, que denominamos ESTÁNDAR. Las simulaciones se realizaron para 10 a 100 sensores distribuidos uniformemente en el escenario indicado en el capítulo anterior.

Como se puede ver en este gráfico, la curva CC OPTIMUM representa la solución óptima, que es la mejor solución posible para el límite operativo de 250 Kbps, pero con un alto costo computacional (300,000.00 iteraciones). Si bien la curva CC MAX es una solución con muchas menos iteraciones (300), que sin embargo mantiene los valores promedio de capacidad del canal, ligeramente más bajos y cercanos a OPTIMUM; demostrando su rendimiento conveniente. Por otro lado, los valores alcanzados tanto por CC REF correspondiente a la curva de referencia REF como por CC STANDARD, correspondiente al mecanismo de asignación de canales del estándar, están muy por debajo de los logrados por los dos mecanismos propuestos.

De la Figura 4.5 es posible observar que tanto el mecanismo OPTIMUM como el MAX tienen una capacidad de canal promedio de aproximadamente 1494 Kbps cuando se evalúan con 10 pares de sensores, manteniendo una diferencia sustancial con los valores REF, que en ese punto alcanzan una capacidad de canal promedio de 1250 Kbps. Mientras que para 100 pares de sensores, los valores OPTIMUM y MAX descienden a 555 Kbps y tanto el REF como el ESTÁNDAR aún más a 365 Kbps. El deterioro de la capacidad promedio del canal se destaca a medida que aumenta el número de pares de sensores, ratificando el comportamiento del mecanismo MAX cerca del OPTIMUM y mucho mejor que el REF y el ESTÁNDAR.

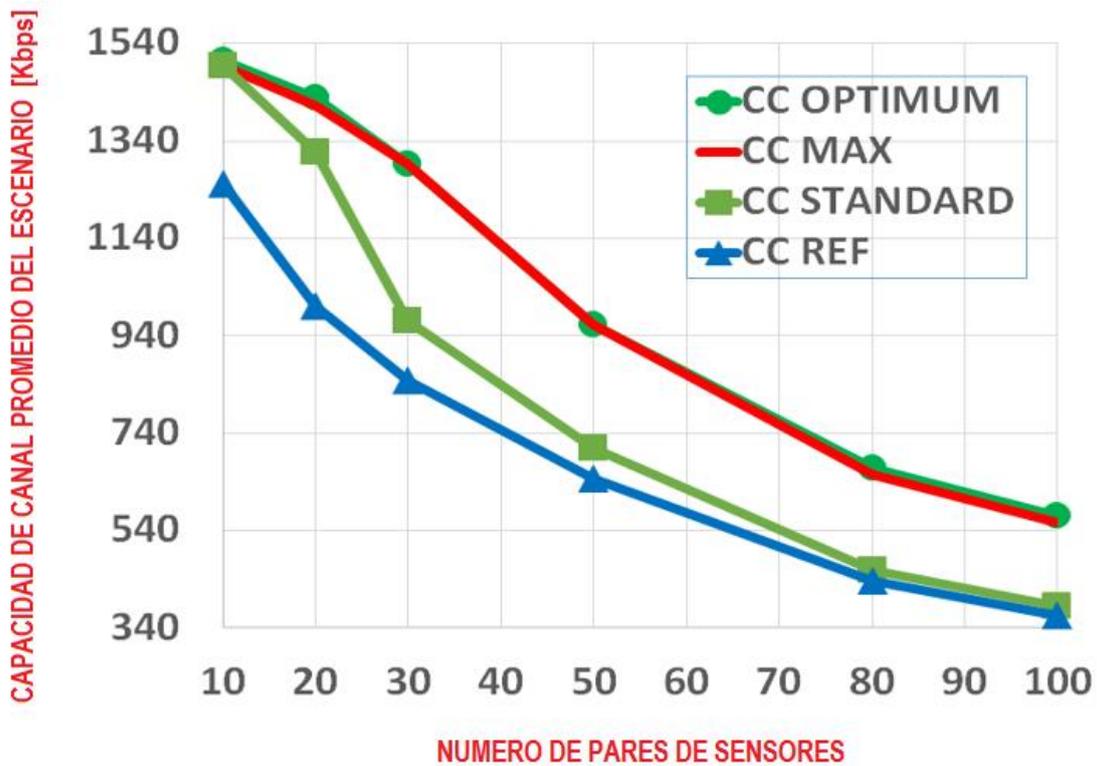


Figura 4.5 Capacidad de Canal Promedio para los dos Mecanismos de Asignación de Canal más el Método de Asignación de Canal Estándar y la Referencia REF vs Número de Pares de Sensores

En la Figura 4.6 se presenta la factibilidad en lugar de la capacidad de canal. Esa es la cantidad de pares de sensores que cumplen con una determinada capacidad de canal, que para este caso se ha considerado el valor de 250 Kbps. Las mediciones comenzaron en 10 pares de sensores, alcanzando una Factibilidad de casi el 100% para los mecanismos OPTIMUM, MAX y STANDARD. Estas simulaciones se llevaron a cabo considerando un máximo de 200 pares de sensores, observando que para esta cantidad, la factibilidad disminuye drásticamente al 60% con el algoritmo OPTIMUM y alcanzó solo el 57% con el MAX. Este comportamiento sugiere que para cantidades de 150 pares de sensores o más, las WSN tendrían serias dificultades en su rendimiento.

El gráfico muestra que, en el caso de 10 pares de sensores, con la técnica MAX (250 Kbps MAX), prácticamente el 100% de los dispositivos cumplen con la capacidad de canal requerida de 250 Kbps. Mientras que con REF (REF de 250 Kbps), solo el 90% de los dispositivos alcanzan la capacidad de canal requerida. Es decir, el mecanismo MAX en este punto de baja congestión de dispositivos, supera la REF en un 10%. Sin embargo, en este punto de referencia,

el método estándar también indica que el 100% de dispositivos cumplen con la capacidad requerida.

La superioridad de rendimiento del mecanismo propuesto, MAX, se destaca en este punto, ya que permite que 100 pares, alcancen una Factibilidad del 80%, un valor definido en la Sección III como el umbral de rendimiento mínimo aceptable. Sin embargo, a partir de 150 pares en adelante, existe un deterioro crítico de la Factibilidad (65%), incluso para esta técnica.

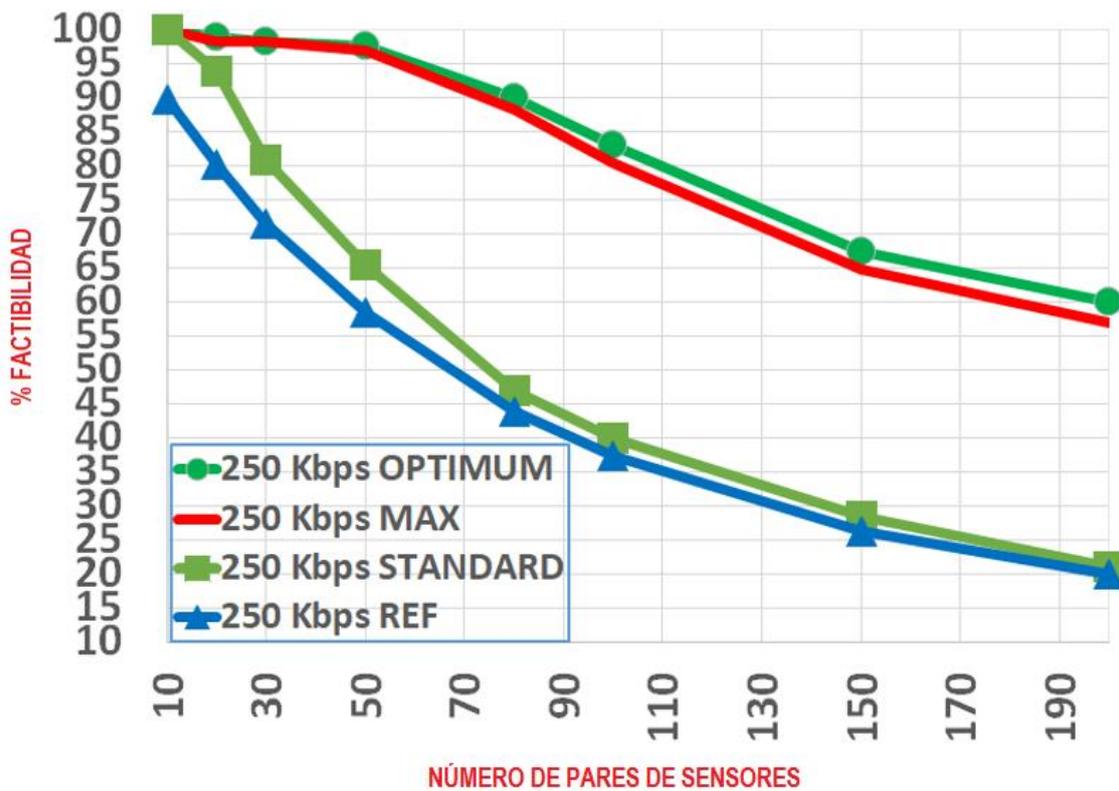
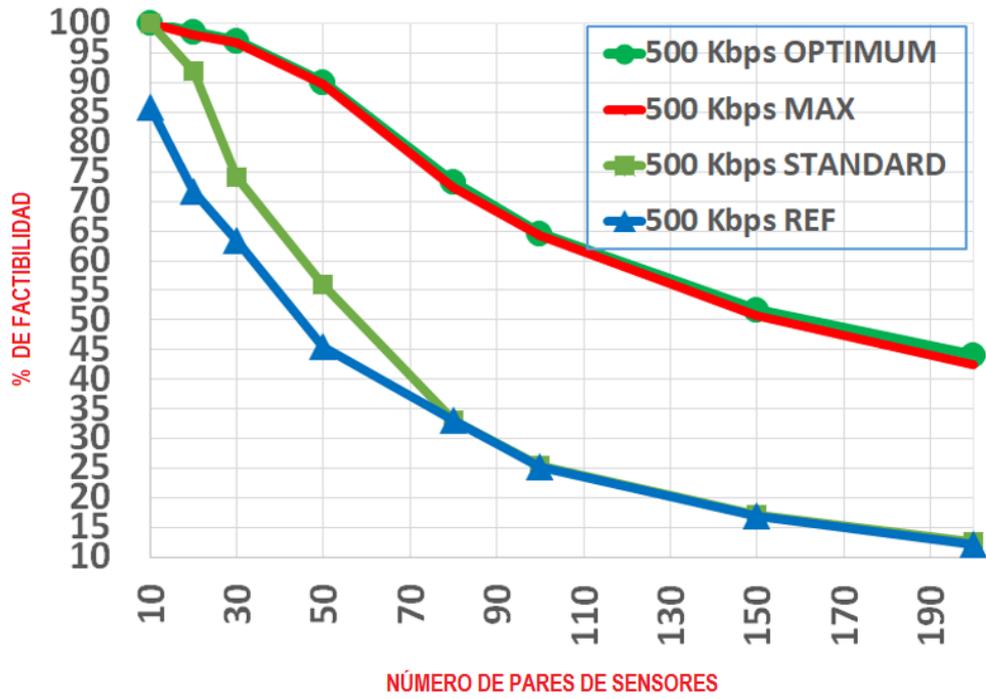
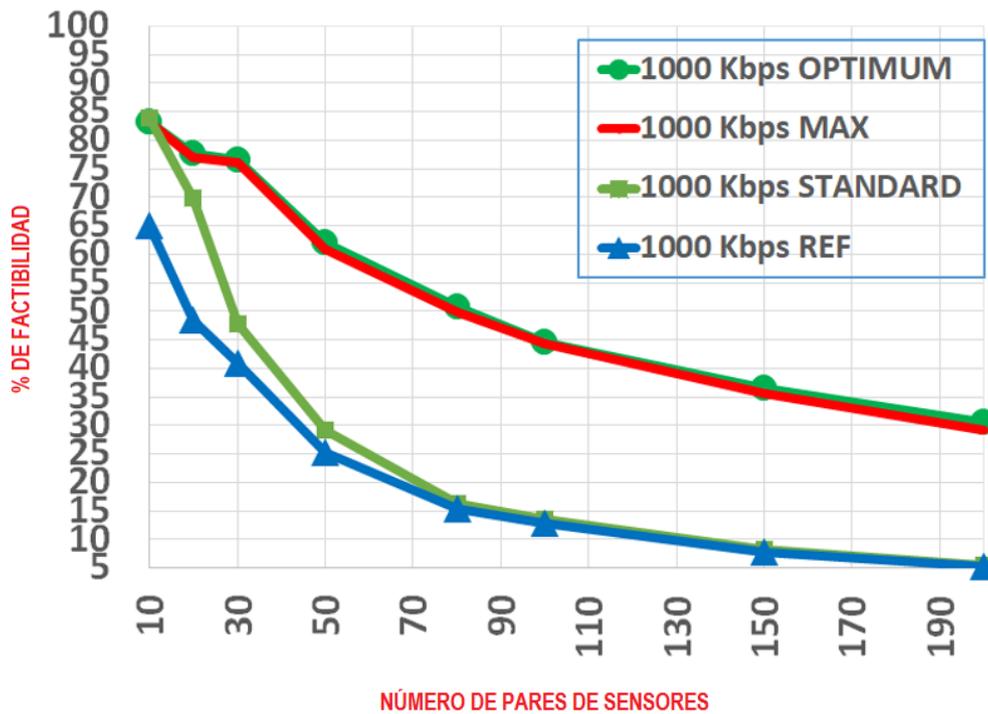


Figura 4.6 Factibilidad para los dos Mecanismos de Asignación de canales con un umbral de $CC_{TH} = 250$ Kbps

Las posibilidades con umbrales de 500 y 1000 Kbps se presentan en la Figura 4.7 (a) y la Figura 4.7 (b) Estos resultados corroboran la efectividad de los mecanismos probados para diferentes umbrales de capacidad del canal.



(a)



(b)

Figura 4.7 (a) Factibilidad para los dos Mecanismos de Asignación de Canales con un Umbral de $CC_{TH} = 500$ Kbps, (b) Factibilidad para los dos Mecanismos de Asignación de Canales con un Umbral de $CC_{TH} = 1000$ Kbps

Otra forma de analizar el rendimiento de estos mecanismos es con las funciones de densidad acumulativa (CDF) correspondientes a cada una de las curvas previamente trazadas, establecidas en el punto de 80 pares de sensores en el escenario, como en la Figura 4.7. El CDF representa el porcentaje de coordinadores que cumplen con cierta capacidad de canal.

La Figura 4.8 muestra que para velocidades más lentas que la referencia de 250 Kbps, cuando se considera el mecanismo OPTIMUM, solo el 10% de sus dispositivos no logran la velocidad deseada, mientras que con el mecanismo MAX el 12% de los dispositivos no lo logran. En la misma figura, con la curva ESTÁNDAR, se puede apreciar que aproximadamente el 55% de sus dispositivos están por debajo de la referencia, mientras que en la curva REF aproximadamente el 57%. Indicando en este punto que el mecanismo OPTIMUM funciona mejor, seguido de cerca por el MAX y lejos de la representación ESTÁNDAR y REF.

De todo esto, podemos concluir que el mecanismo MAX presenta una alternativa favorable, para proporcionar mejores capacidades de canal a los coordinadores de las WSN, trabajando en un escenario urbano de alta densidad, ya que su comportamiento es cercano al OPTIMUM, sin requerir demasiados recursos de procesamiento.

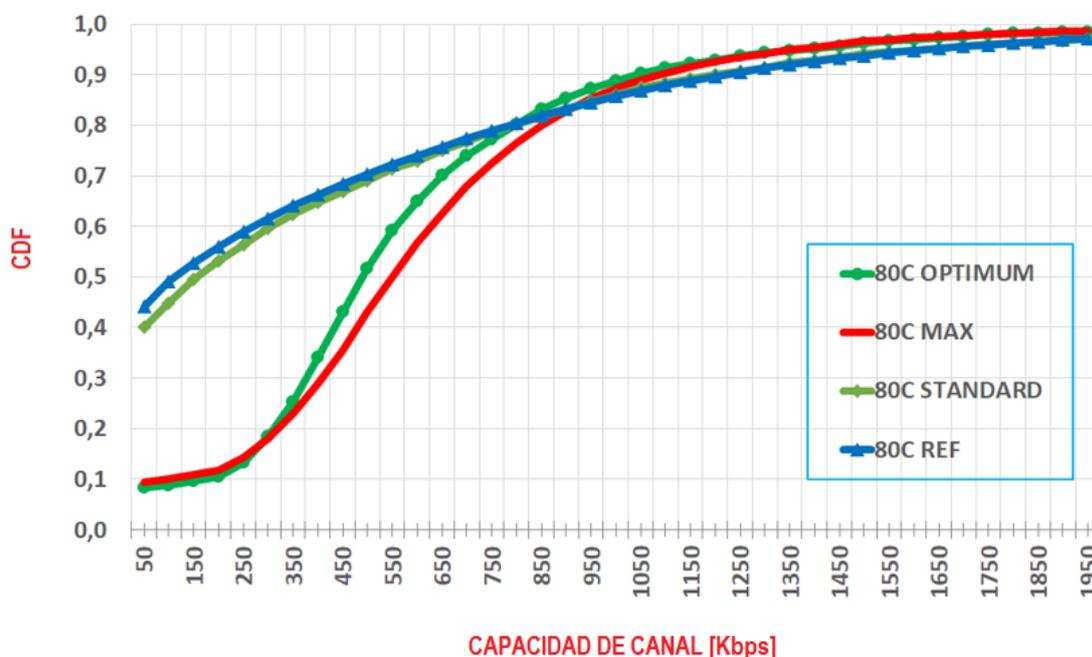


Figura 4.8 CDF de los dos Mecanismos de Asignación de Canal Propuestos con 80 Pares de Sensores y un Umbral $CC_{TH} = 250$ Kbps.

4.6 Conclusiones

La doble contribución entregada en este trabajo ha permitido: Primero, la evaluación del desempeño de las WSN en el escenario propuesto, demostrando para varios niveles de interferencia el grado crítico de congestión que estos dispositivos podrían alcanzar en la banda ISM cuando operan en zonas urbanas de alta densidad de ciudades modernas. En segundo lugar, la propuesta de un mecanismo de asignación de canales heurísticos llamado MAX, que mejora sustancialmente el rendimiento de las WSN bajo fuertes interferencias y el desarrollo de una solución OPTIMUM utilizada como punto de referencia. Es evidente que el mecanismo de selección de canales MAX representa una solución conveniente para el problema propuesto. Este mecanismo distribuye entre los coordinadores del escenario, altas capacidades de canal cercanas a la solución OPTIMUM pero con bajos niveles de procesamiento, presentando resultados muy superiores a los obtenidos actualmente por el método estándar de asignación de canales. Sin embargo, cuando los niveles de congestión del escenario propuesto superan los 150 pares de sensores, se puede ver que los mecanismos propuestos comienzan a ser insuficientes, a pesar de que sus valores son aún más altos que los de la referencia estándar.

Capítulo 5.

Mecanismos de Asignación de Canales en WSN con Acceso Oportunista al Espectro

La tendencia en el uso de aplicaciones con Redes de Sensores Inalámbricas WSN se intensifica cada vez más por la creciente variedad de aplicaciones que las requieren, especialmente en zonas urbanas de alta densidad poblacional. Lo que hace prever que en un futuro cercano de Ciudades Inteligentes (SC), en las que el IoT tendría una amplia acogida, las WSNs podrían congestionar su banda de trabajo ocasionando problemas de transmisión que afecten su QoS. Sin embargo las bandas ISM, usadas actualmente por las WSN, ya se encuentran congestionadas por el uso también creciente de otras tecnologías como Wifi y Bluetooth, entre otras, que comparten la misma banda. Surgiendo como solución promisoría la CR. La cual permitió el desarrollo de las Redes de Sensores CR-WSN, para un manejo, más eficiente del espectro. Sin embargo, para grandes cantidades de dispositivos en escenarios futuros, las CR-WSN, también tendrían dificultades de comunicación. Razón por la cual en el presente trabajo se proponen nuevos mecanismos de asignación de canales que hacen uso del acceso dinámico al espectro. Los cuales, de acuerdo al nivel de congestión alcanzada pueden permitir el uso de solamente la banda ISM en casos de menor congestión y de la banda ISM más la banda Primaria en casos de congestión severa, cuando los mecanismos anteriores sean desbordados. Todo esto para permitir alcanzar una QoS requerida al mayor número de dispositivos CR-WSN del escenario.

5.1 Tema de Discusión: Algunos Desafíos de las WSN en Futuras Ciudades Inteligentes

La globalización tecnológica, en la que están inmersas las WSN está transformando la concepción del mundo en forma acelerada, provocando desafíos y oportunidades que podrían ser aprovechados por quienes tengan la visión y posibilidades de hacerlo. Para ello las ciudades como ente administrativo deberán ser más innovadoras y organizadas para competir en entornos futuros y poder responder de manera efectiva a las demandas y necesidades ciudadanas. Las tecnologías que vemos hoy, con asombrosas aplicaciones en las que se emplean WSN, van marcando su paso hacia un futuro, de grandes masas poblacionales que se concentrarán en espacios urbanos (Ver Figura 5.1).

Pensemos por un momento, en una de esas ciudades inteligentes del futuro, en donde será posible experimentar situaciones que posiblemente ya están ocurriendo en forma aislada en diversas partes del mundo, especialmente en zonas de gran desarrollo tecnológico, pero que no dejaría de asombrar al ciudadano común. Con una situación imaginaria pero posible, de despertarse con pulsaciones suaves provenientes de un brazalete en la muñeca, que provee información sobre el estado de salud, horas de sueño, citas importantes, etc. Recordando además cosas sencillas como la hora de alimentar a la mascota mediante un dispensador automático, que mediante sensores podrá suministrar la cantidad apropiada de alimento; u otras más importantes, como la dieta personal, adecuada del día, con suministros que podrían encontrarse en un refrigerador inteligente, el cual en caso de escasear algún suministro, haría el pedido automáticamente por internet y estaría siempre abastecido.

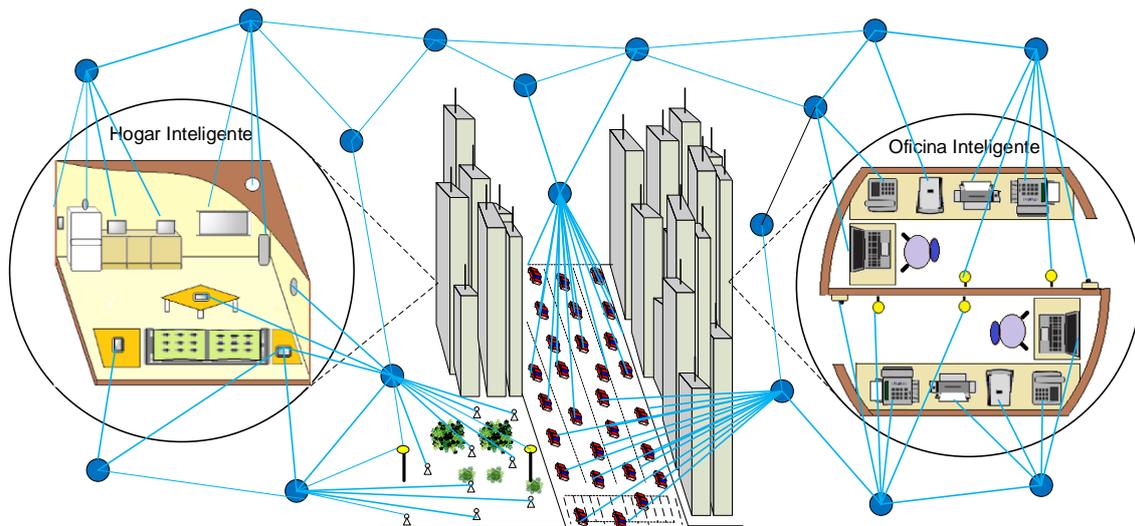


Figura 5.1 Futura Ciudad Inteligente

Por otro lado se encontraría la máquina de café con el café caliente, encendida con anticipación por una indicación del brazalete. Los ambientes de la casa estarían dotados de sensores de movimiento, humo, vibraciones, cámaras, focos inteligentes que proveerían la luminosidad requerida de acuerdo a las necesidades; delgadas pantallas sobre las paredes advertirían sobre noticieros o llamadas importantes, pudiendo visualizar al interlocutor y conversar frente a frente. Las persianas inteligentes se abrirían en forma habitual, o podrían obedecer comandos de voz o, a un comando emitido desde un celular inteligente, el cual por sí mismo está dotado de una amplia gama de sensores, que interactúan con los objetos que los rodea. Los objetos por sí mismo son identificables mediante otras tecnologías importantes como RFID, que en alianza con redes especiales de WSN, tendrían su identidad en la nube.

Para salir de casa se tomaría un vehículo con autonomía en el manejo, asistido por sensores en red, que a su vez se conectan inalámbricamente con los sensores del entorno para evitar colisiones. El sitio donde estaba aparcado el auto cambia su estado a disponible por la indicación de un sensor de parqueo incrustado en el piso. Una vez indicada la ruta al automóvil, este se encarga de buscar la mejor forma de llegar al destino con rapidez y seguridad. Al acercarse al destino las aplicaciones en las pantallas del auto, indicarán mediante el uso de WSN los parqueos cercanos disponibles.

En igual forma las tareas cotidianas en las oficinas de trabajo estarán rodeadas de aplicaciones con WSN en tareas sencillas como habilitación de accesos hasta importantes temas de seguridad.

Habrà una infinidad de aplicaciones con pequeños dispositivos sensores, incorporados en

equipos médicos, en dispositivos médicos portables o en el interior del cuerpo humano, para medir signos vitales importantes; en el transporte, autos, autobuses, camiones, trenes, todo tipo de sensores, tomando múltiples mediciones; en el hogar con aplicaciones domóticas, que tienen que ver con sensado de condiciones ambientales, fuego, humo, vibraciones, tsunamis.

Tanto en el hogar como en las oficinas, escuelas y por supuesto en la administración de ciudades inteligentes, será evidente y casi cotidiano, la interacción con el mundo interconectado, posibilitado por los sorprendentes avances de la tecnología, que están para facilitar la vida de los usuarios en formas sencillas, cuyo uso diario permitiría pensar, como que si siempre hubiesen existido. Sin embargo, por detrás está un universo de WSN que transmiten sus mediciones a un sistema en la nube con capacidad de almacenamiento y procesamiento.

Esta visión futurista presentada, conlleva a prever, la convergencia de múltiples tecnologías, entre las que las WSN, tienen un papel destacado. Entrelazando a los humanos con animales y objetos del universo, con el propósito de avanzar positivamente al bienestar colectivo, armonizando recursos y servicios para grandes masas poblacionales concentradas en ciudades inteligentes.

5.2 Mecanismos de Asignación de Canales con OSA

Para el desarrollo de estos mecanismos se considera el mismo escenario presentado en el Capítulo 3, con la novedad que en los casos requeridos, las WSN pueden ser reemplazadas por los nuevos dispositivos CR-WSN, que tienen capacidades de acceso oportunista a otras bandas. En la actualidad la banda que está siendo utilizada para acceso dinámico es la banda UHF de TV, la cual reúne algunas características favorables, de propagación, como mayor alcance, mejor penetración y el empleo de menos potencia. Añadiendo a esto que el apagón analógico, por el cambio a TV digital deja espacios disponibles en la banda de televisión.

En el presente trabajo se ha desarrollado un Mecanismo Heurístico de asignación de canales de excelente desempeño y con un número bajo de iteraciones llamado MAX-OSA. Este mecanismo es una evolución del mecanismo MAX presentado en el Capítulo 4 [146], que tiene un desempeño similar al Mecanismo Óptimo también desarrollado en el trabajo mencionado.

5.2.1 Formulación Matemática del Problema

Para el desarrollo matemático de los mecanismos de asignación de canales, en un escenario de trabajo donde las CRSNs son los principales protagonistas, representadas por pares sensor \rightarrow coordinador se utiliza la siguiente nomenclatura: un set de N elementos para los coordinadores $C(i) = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_N\} \forall i \in (1, 2, 3, \dots, N)$, otro para los sensores $S(i) = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\} \forall i \in (1, 2, 3, \dots, N)$. Los AP del escenario son representados por un set de K elementos tal que: $AP(l) = \{AP_1, AP_2, AP_3, \dots, k\} \forall l \in (1, 2, \dots, k)$. La capacidad de canal de cada coordinador se la expresa como: $CC(i) = (CC_1, CC_2, CC_3, \dots, CC_N) \forall i \in (1, 2, \dots, N)$. Un coordinador i trabajando en un canal j se lo representa mediante la matriz C_{ij} .

El número total de canales que pueden asignarse a las CR-WSN está representado por $Ch_T = Ch_{ISM} + Ch_{BP}$, en donde Ch_{ISM} representa a los canales de la banda ISM utilizados y Ch_{BP} a los canales de banda primaria utilizados.

Para efectos de nomenclatura los canales de banda ISM son numerados desde Ch_I hasta Ch_{ISM} y los de banda Primaria desde Ch_{ISM+1} hasta Ch_{ISM+BP} . De tal manera que el vector que representa a los canales disponibles es el siguiente:

$$Ch_{ISM+BP+1}, \dots, Ch_{(ISM*BP)+ISM+BP} \quad (5.1)$$

Un canal específico puede ser nombrado como:

$$Ch_j \forall j \in \{1, \dots, T\} \quad (5.2)$$

5.2.2 Descripción del Mecanismo MAX-OSA: (ISM&BP)

Este mecanismo es una evolución del algoritmo Max mencionado con anterioridad, al cual llamaremos MAX-OSA. El cual permite a las CR-WSN sobrepasar los valores de rendimiento alcanzados con la versión previa, mediante un proceso iterativo de selección que escoge aquellos canales ISM que maximizan la factibilidad de la red, siempre que esta factibilidad cumpla con un umbral de calidad. En caso de no lograr alcanzar dicho umbral, el algoritmo

hace el mismo procedimiento con los canales de banda primaria disponibles, logrando excelentes resultados, con un número bajo de iteraciones.

El seudocódigo del algoritmo utilizado en MAX-OSA es representado en la Figura 5.2, y su explicación es la siguiente:

Data:	$C_i, N_{i_{max}}, Ch_j, f_{th}$
Resultado:	maximizar [$F(\%)$]
1.	Se seleccionan aleatoriamente canales iniciales para Cada uno de los coordinadores
2.	while ; mientras no se alcance un criterio de parada ; Verificar si N_{max} se ha cumplido o si ; el criterio de convergencia ha sido alcanzado
3.	C_i ; Coordinator i is seleccionado
4.	$CH_{ISM} = f_{ij} \geq f_{th}$
5.	; Ordenar CH_{ISM} de mayor a menor
6.	from $j=1$ hasta el final
7.	if $CC(Ch_j) > 250 Kbps$ then
8.	Añadir $C_{i,j}$ a matriz de resultados; flag =1;
9.	end (7)
10.	if flag = 0 then
11.	$CH_{BP} = f_{ij} \geq f_{th}$
12.	; Ordenar CH_{BP} de mayor a menor
13.	from $j=1$ hasta el final
14.	if $CC(Ch_j) > 250 Kbps$ then
15.	Add $C_{i,j}$ a matriz de resultados; flag =1;
16.	end (14)
17.	end (10)
18.	if flag = 0 then
19.	; obtención del mejor canal ISM+BP Ch_j for C_i
20.	Add $C_{i,j}$ a matriz de resultados;
21.	end (18)
22.	Actualizar iteraciones N_i
23.	if $i=N$ then
24.	$i=1$
25.	end (23)
26.	end (2)

Figura 5.2 Pseudocódigo del Algoritmo Max-OSA

Inicialmente se asignan canales en banda ISM aleatorios (línea: 1). Al inicio de lazo while se comprueba si se ha alcanzado convergencia o el número máximo de iteraciones (línea: 2). Se selecciona $i=1$, para indicar que se inicia con la evaluación del primer coordinador del escenario (línea: 3). Se escogen aquellos canales ISM que cumplen con el umbral de factibilidad f_{th} (línea: 4). Se ordenan los canales escogidos de mayor a menor factibilidad (línea: 5). Se inicia $j=1$, para indicar el canal que da la factibilidad más alta (línea: 6). Se evalúa si el canal j a su vez cumple con la capacidad de canal deseada para el coordinador i (línea: 7). Cuando se cumple con la línea anterior entonces el canal escogido para el coordinador evaluado es agregado a la matriz de resultados C_{ij} (línea: 8). En caso de no haber encontrado canal ISM que cumpla con ambos requerimientos, entonces se escogen los canales de banda primaria que cumplen con el umbral de factibilidad (línea: 10-11).

Luego se ordenan los canales escogidos de mayor a menor factibilidad (línea: 12). Se inicia $j=1$, para indicar el canal que da la factibilidad más alta (línea: 13). Se evalúa si el canal j a su vez cumple con la capacidad de canal deseada para el coordinador i (línea: 14). Cuando se cumple con la línea anterior entonces el canal escogido para el coordinador evaluado es agregado a la matriz de resultados C_{ij} (línea: 15). En caso de que ni los canales ISM ni los canales BP cumplan con los umbrales requeridos (línea: 18) entonces se evalúa cuál de los canales, tanto ISM como BP, da la factibilidad más alta (línea: 19). El canal escogido para el coordinador evaluado es añadido a la matriz de resultados C_{ij} (línea: 20). Se incrementa en uno el número de iteraciones (línea: 22). Se regresa al lazo while hasta terminar la evaluación de todos los coordinadores, completada esta acción, se empieza a recorrer el lazo, hasta que se alcancen el número máximo de iteraciones o el estado de convergencia (línea: 23-25). Logrado esto finaliza el algoritmo (línea: 26).

La selección final de canales es tomada de la matriz C_{ij} , que es la que proporciona los resultados esperados.

5.3 Evaluación del Desempeño

Para evaluar el desempeño del Mecanismo Max-OSA según el modelo propuesto en el Capítulo III, se emplea como herramienta de trabajo, computadoras Hewlett Packard Intel Core I7 de 3.4GHz de velocidad y 8GB de memoria RAM. En las que, se desarrollaron los programas de simulación para dispositivos CR-WSN objeto del presente estudio, mediante aplicaciones en Matlab.

5.3.1 Parámetros de Configuración

El algoritmo MAX-OSA presenta dos desafíos al momento de su configuración, el valor de umbral de factibilidad, utilizado para decidir si se asigna canal ISM o BP, y el número de escenarios a utilizar para poder obtener resultados confiables. Para el umbral de factibilidad, se realizaron varias pruebas con 100 escenarios de 150 sensores. Se escogieron valores de umbral de 0.65, 0.75, 0.85 y 0.95 para evaluar el desempeño de la red aplicando el algoritmo. Estos valores se probaron con 4 diferentes valores de iteración: 5, 10, 100 y 500. La Tabla 5.1 muestra los valores de factibilidad promedio de la red de sensores para los parámetros experimentales detallados.

Tabla 5.1 Valores de Factibilidad de la red

	Umbral de Factibilidad			
Iteraciones	0.95	0.85	0.75	0.65
500	86	84	74.11	68
100	84	84	76.66	68
10	80.66	78	74.66	68
5	74.66	75.33	75.33	66.66

Como se puede apreciar, los resultados muestran que con un umbral de factibilidad de 0.85 obtenemos muy buenos resultados sin la necesidad de realizar muchas iteraciones, que demandarían una gran cantidad de procesamiento. Para escoger el número de escenarios necesarios se compararon los resultados obtenidos de factibilidad de la red, capacidad promedio y número de iteraciones necesarias para que el algoritmo converja, teniendo en cuenta que ya se ha fijado el valor de umbral de factibilidad y que se están usando escenarios con 150 coordinadores.

En la Tabla 5.2 se aprecian los resultados de factibilidad (máxima, promedio y mínima) para 100, 300 y 500 escenarios. Respecto a este parámetro no se detectan cambios significativos en

los resultados al aumentar el número de escenarios, por tanto, no se puede tomar una decisión con estos resultados.

Tabla 5.2 Factibilidad ($f_{th} = 0.85$; No. Coordinadores = 150)

	Número de escenarios		
Factibilidad	100	300	500
MIN	75.33	75.33	74
PROM	79.08	79.01	79.0027
MAX	80	80	80

En la Tabla 5.3 se pueden observar los resultados de capacidad promedio de canal de la red de 150 sensores (máxima, promedio y mínima) para 100, 300 y 500 escenarios. A pesar de que los valores promedio no varían significativamente, para el valor máximo vemos que existe un incremento del 12.06% cuando aumentamos de 100 a 300 escenarios. Así mismo, vemos un incremento del 4.74% cuando aumentamos de 300 a 500 escenarios de prueba. Dicho aumento es menos significativo que el primero, por lo que se decidió que el número de escenarios de prueba adecuado sea de 300, ya que brinda una dispersión adecuada para obtener resultados confiables, y poder realizar una evaluación efectiva del algoritmo.

Tabla 5.3 Capacidad de canal ($f_{th} = 0.85$; Número de Coordinadores = 150)

	Número de escenarios		
Capacidad promedio de la red	100	300	500
MIN	342.73	334.35	309.91
PROM	410.92	412.31	412.3
MAX	489.22	548.2	570.09

La Tabla 5.4 muestra los parámetros de configuración del algoritmo MAX-OSA.

Tabla 5.4 Parámetros del mecanismo MAX-OSA

Descripción	Valor
Umbral de factibilidad, f_{th}	0.85
Número de escenarios	300
Número de canales CR-WSN/WSN en banda ISM	16
Número de canales en banda Primaria	3
Número de canales WLAN	11
Máximo número de iteraciones, Ni_{MAX}	500

5.4 Análisis de los Resultados

Acorde a los resultados de calibración obtenidos, se utilizaron 300 escenarios, con un umbral de factibilidad de 0.85, para evaluar el desempeño del mecanismo propuesto. Se evaluaron escenarios con 60, 90, 120, 150, 180 y 210 coordinadores desplegados de forma aleatoria. La Figura 5.3 muestra la curva del comportamiento del algoritmo MAX del Capítulo 4, el cual solo asigna canales ISM; a la que llamaremos MAX(ISM) de ahora en adelante. Así mismo, muestra las curvas de comportamiento del algoritmo MAX-OSA con 1, 2 y 3 canales de banda primaria disponibles, denominadas MAX-OSA (ISM&BP+1), MAX-OSA (ISM&BP+2) y MAX-OSA (ISM&BP+3) respectivamente.

La gráfica muestra que el desempeño del algoritmo, al tener canales de banda primaria a disposición, es superior al obtenido por la versión anterior, que solo utiliza canales ISM. Sin embargo, es importante recalcar que a pesar de tener a su disponibilidad dichos canales, los canales ISM tienen prioridad por sobre los de BP. Esto es porque su disponibilidad es permanente sin importar su desempeño, a diferencia de los canales BP, cuya disponibilidad es particular de cada escenario, variante en el tiempo y en el espacio. Es por esto que el algoritmo fue diseñado para asignar canales ISM mientras la factibilidad de la red esté por encima de un

umbral. Cuando la factibilidad se encuentra por debajo de dicho umbral, entonces el algoritmo puede disponer de canales BP en búsqueda de un mejor desempeño de la red.

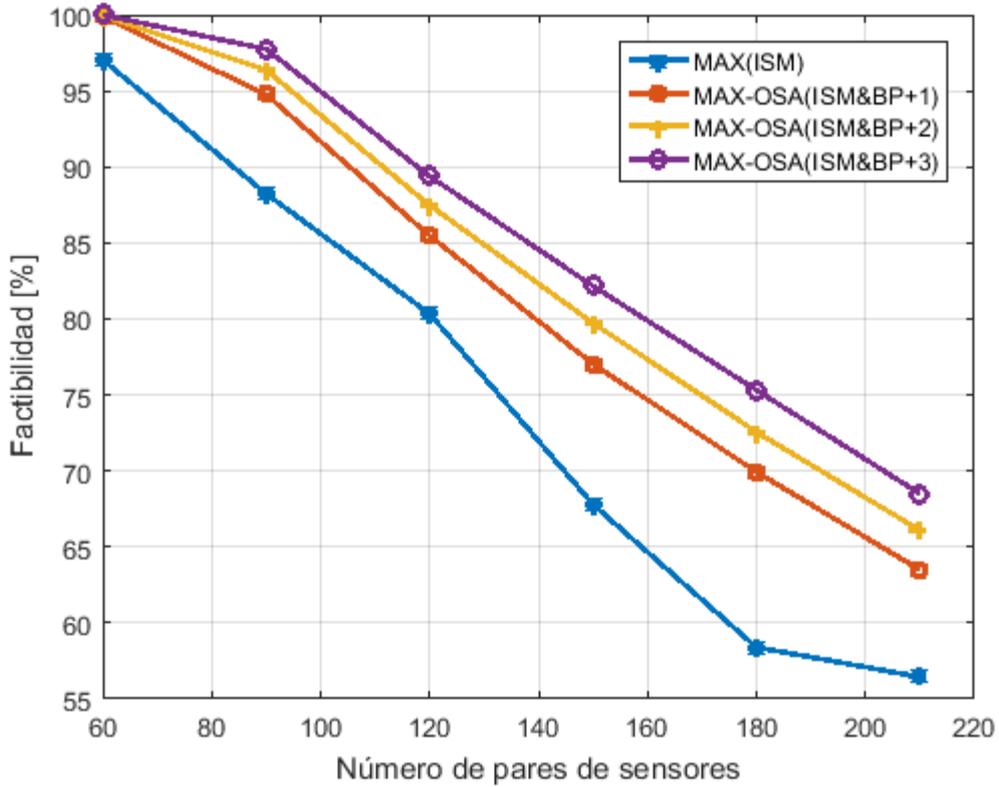


Figura 5.3 Resultados de factibilidad promedio (300 escenarios) para algoritmo MAX y MAX-OSA

La Figura 5.4 muestra el desempeño del algoritmo MAX-OSA con 3 canales BP disponibles, en comparación con tres mecanismos diferentes. El primero es el algoritmo MAX con solo canales ISM. El segundo es el algoritmo de asignación aleatoria de canales, tanto ISM como 3 BP, llamada REF(ISM&BP+3). La tercera curva presenta el desempeño del algoritmo estándar de asignación de canales, si este tuviera a su disposición 3 canales BP adicionales a los canales ISM, llamada STANDARD(ISM&BP+3). Los resultados muestran que el mecanismo propuesto tiene un mucho mejor desempeño que aquellos mecanismos actualmente disponibles, así estos tuvieran los 3 canales BP a su disposición. Con esto se demuestra que la considerable mejoría obtenida por MAX-OSA no solo se debe a tener más canales a su disposición, sino que este debe mucho su desempeño al proceso de maximización de la factibilidad de la red.

Es así como, por ejemplo, para 180 coordinadores, MAX-OSA nos da una factibilidad promedio de 75%; mientras que su predecesor tiene un 58%; el mecanismo estándar con los 3 canales BP disponibles apenas un 38%; y la asignación aleatoria apenas un 27% de factibilidad promedio.

Acorde a [131], los canales de banda primaria no se encuentran disponibles en todo momento, ni tampoco su disponibilidad se puede definir en intervalos fijos del día. Por lo tanto, dicha disponibilidad se define mediante una probabilidad. La Figura 5.5 muestra el comportamiento del algoritmo con tres canales BP con probabilidad de disponibilidad del 25%, 50% y 75%, y cuyas curvas son ISM&BP3(25%), ISM&BP3(50%) e ISM&BP3(75%) respectivamente. En la gráfica se puede apreciar en el caso de un 25% de disponibilidad, que a pesar de que los canales BP tienen poca participación, su desempeño sigue siendo superior al algoritmo anterior. Y como es previsible, a medida que esta probabilidad aumenta, incrementa así también el desempeño de la red, evaluado mediante la factibilidad.

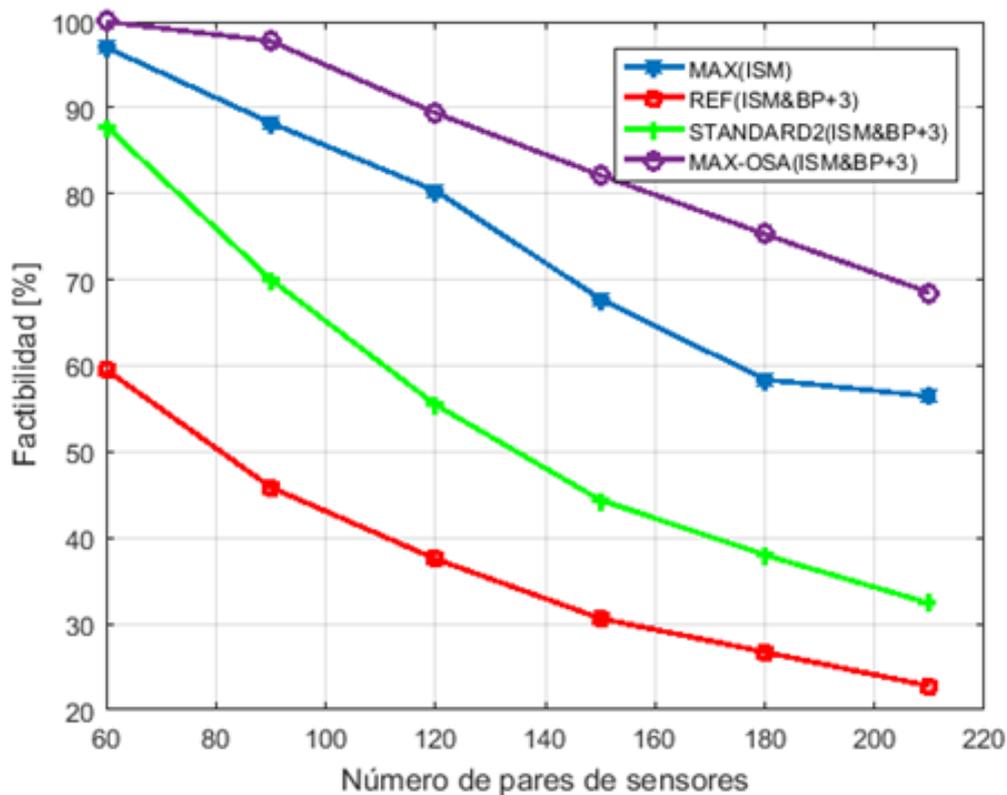


Figura 5.4 Resultados de factibilidad promedio (300 escenarios) para algoritmo MAX, MAX-OSA (+3 BP), algoritmo estándar (+3 BP) y asignación aleatoria (+3 BP).

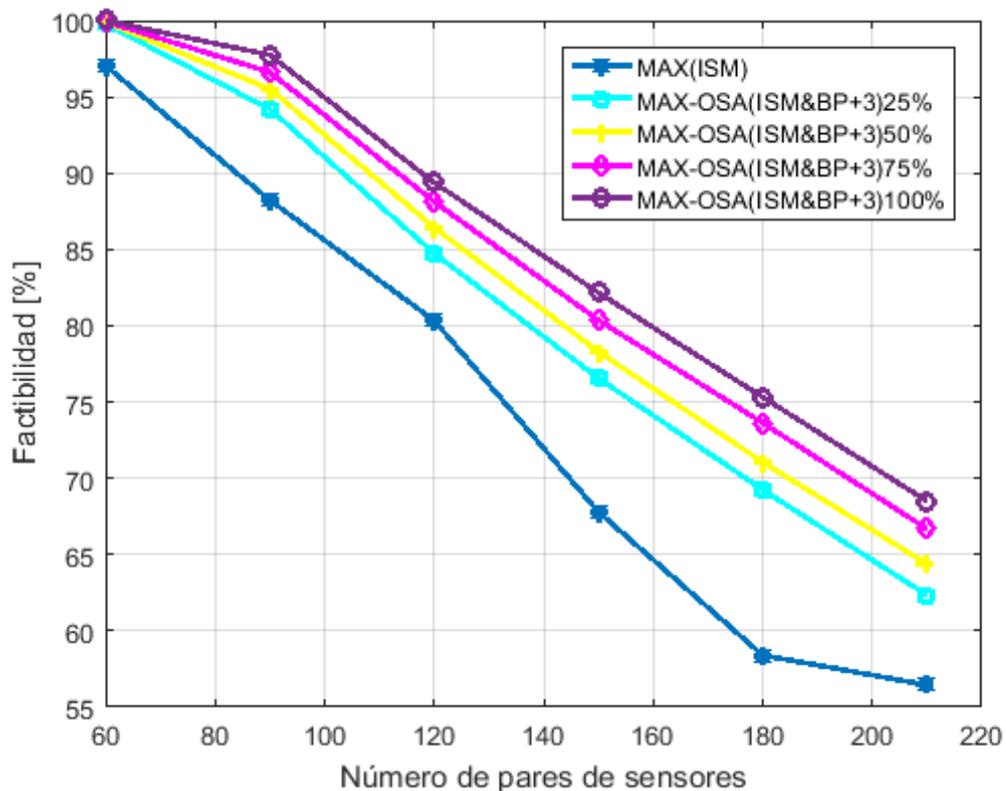


Figura 5.5 Resultados de factibilidad promedio (300 escenarios) para diferentes valores de probabilidad de disponibilidad.

La Figura 5.6 muestra los porcentajes de asignación de canales de banda primaria, tanto para el mecanismo aleatorio REF, el mecanismo STANDARD2 y el mecanismo propuesto MAX-OSA. Se puede apreciar que tanto para REF como para STANDARD2 el porcentaje de asignación no varía mayormente. En cambio, para el mecanismo propuesto, MAX-OSA, el porcentaje de asignación de canales BP se incrementa hasta llegar a un valor de saturación (aprox. 14.5%). Esto es debido a que cuando se alcanza determinado número de coordinadores, el umbral de factibilidad no es posible de alcanzar, por ende el comportamiento de asignación ya no requiere de un incremento en el porcentaje de coordinadores con canal BP asignado.

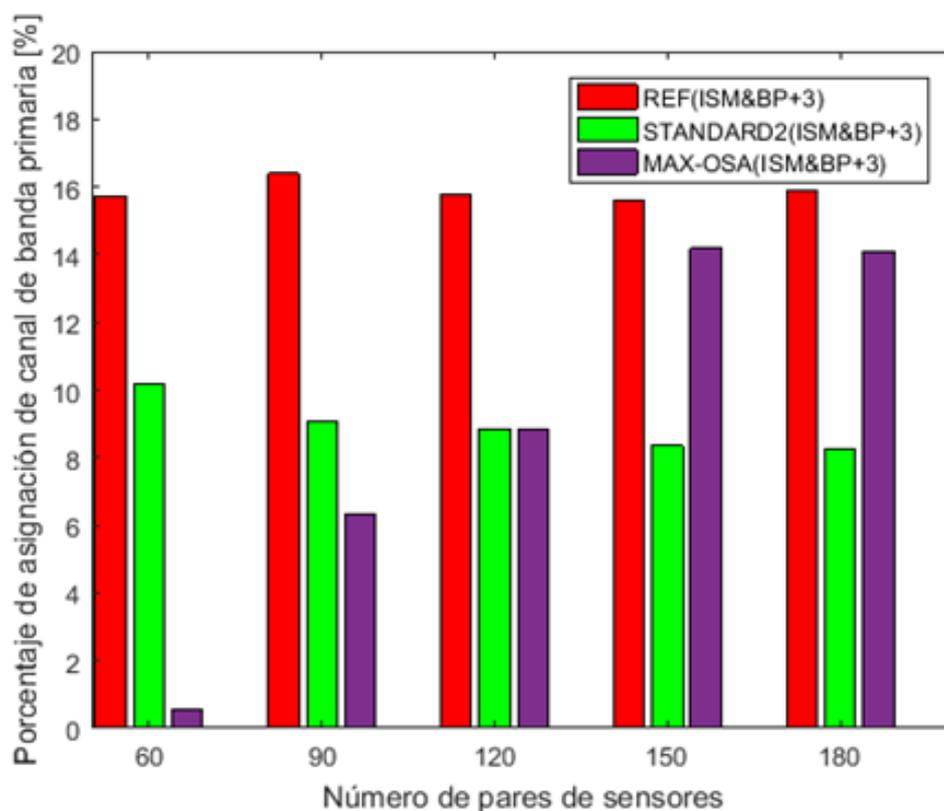


Figura 5.6 Porcentaje de asignación de canales de banda primaria

Un método de medición adicional del desempeño del mecanismo MAX-OSA es la función de distribución acumulada (CDF). La Figura 5.7 nos muestra las CDFs del mecanismo REF, del STANDARD2 y del mecanismo propuesto (MAX-OSA) para escenarios con 90 coordinadores. En dicha gráfica se puede observar que MAX-OSA optimiza la asignación de canales y consigue tener cerca del 98% de los coordinadores con capacidad de canal por encima del umbral de 250 Kbps, mientras que los otros mecanismos se encuentran muy por debajo, con un 40% y un 65% para REF y STANDARD2, respectivamente. A su vez, la CDF de MAX-OSA muestra que las capacidades de canal de los coordinadores se agrupan cerca del valor umbral. Esto es debido a que el mecanismo maximiza el desempeño de todos los dispositivos en conjunto, con el objetivo de conseguir un mayor número de coordinadores por encima del umbral de capacidad; pero para conseguir dicho objetivo, algunos coordinadores disminuirán su desempeño en beneficio del grupal.

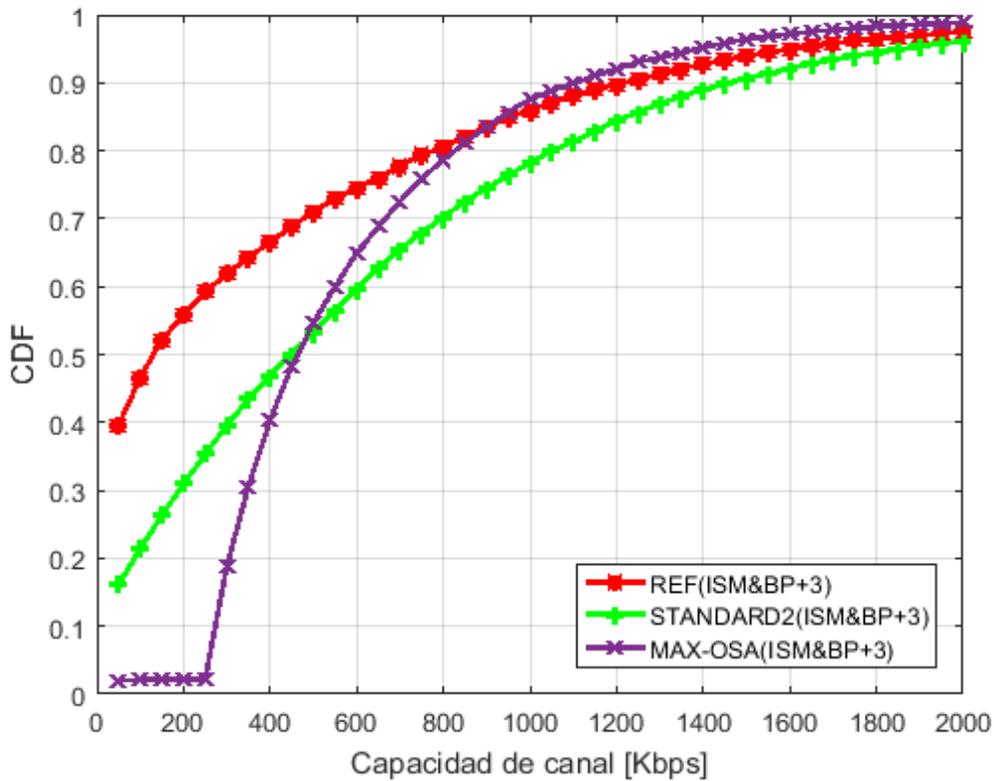


Figura 5.7 CDF del mecanismo propuesto con 90 pares de sensores y umbral $CC_{th} = 250 Kbps$.

De todo esto podemos concluir que el mecanismo MAX-OSA propuesto presenta una alternativa favorable, para proporcionar mejores capacidades de canal a los coordinadores de las CR-WSN, trabajando en un escenario urbano de alta densidad, utilizando de forma eficiente canales de banda primaria cuando es estrictamente requerido.

5.5 Conclusiones

Con el mecanismo heurístico de asignación de canales propuesto en este trabajo MAX-OSA con 1, 2 y 3 canales de banda primaria disponibles, denominado MAX-OSA (ISM&BP+1), MAX-OSA (ISM&BP+2) y MAX-OSA (ISM&BP+3) respectivamente, se obtuvo un comportamiento superior a su antecesor el Mecanismo MAX utilizado sólo en banda ISM. En igual forma se comprobó que supera ampliamente los resultados de mecanismos como el REF o el STANDARD2 con disponibilidad de un número similar de canales. Por otro lado, debido a que los canales no están disponibles todo el tiempo y en todo lugar, se trabajó con porcentajes

de disponibilidad, comprobando que el mecanismo MAX-OSA tiene un comportamiento muy superior en comparación al MAX(ISM), aún para bajos porcentajes de disponibilidad. Se pudo corroborar además que el algoritmo MAX-OSA primero asigna eficientemente canales en banda ISM siempre y cuando exista en esta banda un porcentaje de factibilidad superior al de referencia, de lo contrario empezará a buscar nuevas capacidades en banda primaria. Sin embargo cuando la factibilidad en banda primaria no supere a la de referencia se saturaría por no poder asignar nuevos canales. Pues, mientras mayor sea el número de canales primarios disponibles mejores serán las capacidades de canal que se puedan alcanzar en la red.

Conclusiones y Recomendaciones

Este trabajo, ha permitido: por un lado evaluar el desempeño de las WSN en el escenario propuesto, demostrando para diversos niveles de interferencias, el alto grado de congestión, que estos dispositivos podrían alcanzar, en la banda ISM, en espacios urbanos de alta densidad de ciudades modernas; y, por otro lado desarrollar una solución heurística de asignación de canales, que mejora sustancialmente el desempeño de las WSN sometidas a fuertes interferencias trabajando únicamente en banda ISM. Dejando en claro de manera concluyente que el mecanismo de selección de canales Max, representa una solución conveniente para la problemática de congestión en banda ISM propuesta; ya que distribuye entre los coordinadores del escenario altas capacidades de canal cercanas al Óptimo. Sin embargo, cuando los niveles de congestión del escenario propuesto sobrepasan los 150 pares de sensores se puede observar que los mecanismos existentes para banda ISM no son suficientes.

Motivo por el cual se desarrolló un nuevo algoritmo Max repotenciado con capacidad para hacer uso de canales primarios pertenecientes a otras bandas. Esto fue posible por el advenimiento de las técnicas OSA y los dispositivos cognitivos CR-WSN. De esta manera, utilizando el modelo de escenario planteado, se pudo analizar el comportamiento de estos nuevos dispositivos en escenarios aún más congestionados, con un mecanismo MAX repotenciado al que se lo llamó MAX-OSA. El cual mejora su capacidad de selección de canales basando sus procesos estadísticos en porcentaje de factibilidad y no en capacidad de canal.

El Mecanismo MAX-OSA, tiene la capacidad de asignar primero canales en banda ISM y cuando la factibilidad sea menor a un umbral de factibilidad empezará a asignar canales en banda primaria de acuerdo a la disponibilidad existente. Comprobándose con el análisis de los resultados que MAX-OSA mejora las asignaciones realizadas por MAX y otros mecanismos de comparación utilizados como el REF y STANDARD2.

Dos características importantes de los Mecanismos MAX-OSA y MAX es que poseen bajo nivel de procesamiento como se pudo comprobar en los procedimientos de calibración del algoritmo; y, como se pudo observar en el Capítulo 4, MAX tiene un comportamiento cercano al Mecanismo Óptimo, por tanto MAX-OSA que mejora a MAX tendrá un comportamiento aún más cercano al Óptimo.

Como recomendación queda abierta la posibilidad de evaluar el comportamiento con diferentes cantidades y disponibilidades de canales primarios para enriquecer aún más el análisis de este tema.

Conocidos los resultados se recomienda el empleo de MAX-OSA para escenarios con alto

grado de congestionamiento, presentando un abanico muy grande de posibilidades dependiendo de la disponibilidad de canales primarios en tiempo y espacio.

Bibliografía

- [1] R. Du, P. Santi, M. Xiao, A. V. Vasilakos and C. Fischione, "The Sensable City: A Survey on the Deployment and Management for Smart City Monitoring," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1533-1560, Second quarter 2019.
- [2] S. P. Mohanty, U. Choppali and E. Kougianos, "Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone," in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 60-70, July 2016.
- [3] A. Founoun and A. Hayar, "Evaluation of the concept of the smart city through local regulation and the importance of local initiative," 2018 *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-6.
- [4] C. A. Ramírez, R. C. Barragán, G. García-Torales and V. M. Larios, "Low-power device for wireless sensor network for Smart Cities," 2016 *IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC)*, Puerto Vallarta, 2016, pp. 1-3.
- [5] A. Lavric and V. Popa, "Performance evaluation of WSN topology control algorithms that can be used in the Smart City concept," 2015 *7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Bucharest, 2015, pp. ES-5-ES-8.
- [6] M. L. Rajaram, E. Kougianos, S. P. Mohanty and P. Sundaravadivel, "A wireless sensor network simulation framework for structural health monitoring in smart cities," 2016 *IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, Berlin, 2016, pp. 78-82.
- [7] Mircea Eremia, Lucian Toma, Mihai Sanduleac, "The Smart City Concept in the 21st Century", *Procedia Engineering*, Volume 181, 2017, Pages 12-19.
- [8] M. Abu-Matar and R. Mizouni, "Variability Modeling for Smart City Reference Architectures," 2018 *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-8.
- [9] S. V. Nandury and B. A. Begum, "Smart WSN-based ubiquitous architecture for smart cities," 2015 *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Kochi, 2015, pp. 2366-2373.
- [10] O. B. Mora, R. Rivera, V. M. Larios, J. R. Beltrán-Ramírez, R. Maciel and A. Ochoa, "A Use Case in Cybersecurity based in Blockchain to deal with the security and privacy of

citizens and Smart Cities Cyberinfrastructures," 2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-4.

- [11] H. Dhaka, A. Jain and K. Verma, "Impact of coordinator mobility on the throughput in a ZigBee mesh networks," 2010 IEEE 2nd International Advance Computing Conference (IACC), Patiala, 2010, pp. 279-284.
- [12] Ali, A.; Ming, Y.; Chakraborty, S.; Iram, S. "A Comprehensive Survey on Real-Time Applications of WSN". Future Internet, 2017.
- [13] K. Chopra, K. Gupta and A. Lambora, "Future Internet: The Internet of Things-A Literature Review," 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon), Faridabad, India, 2019, pp. 135-139.
- [14] A. Zakharov, A. Romazanov, A. Shirokikh and I. Zakharova, "Intellectual Data Analysis System of Building Temperature Mode Monitoring," 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-6.
- [15] L. Berbakov, M. Batić and N. Tomašević, "Smart Energy Manager for Energy Efficient Buildings," IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-4.
- [16] L. M. Borges, F. J. Velez and A. S. Lebres, "Survey on the Characterization and Classification of Wireless Sensor Network Applications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 1860-1890, fourth quarter 2014.
- [17] Mordor Intelligence. (2019). WIRELESS SENSORS NETWORK MARKET - GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020 - 2025). May 09 2020, de Mordor Intelligence web link: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wireless-sensor-networks-market>.
- [18] H. T. Madan and P. I. Basarkod, "A Survey on Efficient Spectrum Utilization for Future Wireless Networks Using Cognitive Radio Approach," 2018 4th International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT), Mangalore, India, 2018, pp. 47-53,
- [19] D. S. Smieeee, Sangem Rasri, "Automatic street light control system using wireless sensor networks", IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), 2017.
- [20] D. Mankar and B. S. Chaudhari, "Dynamic performance analysis of IEEE 802.15.4 devices under various RF interferences," 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, 2016, pp. 1-4.

- [21] Y. Chen, L. Zhao and H. Chen, "Study of congestion control for wireless sensor networks based on small user," 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Novosibirsk, 2016, pp. 314-316.
- [22] A. Abid, A. Kachouri and A. Mahfoudhi, "Data analysis and outlier detection in smart city," 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), Sfax, 2017, pp. 1-4.
- [23] L. Feng and S. Ku, "Strategy of Anti-Interference Based on Non-Orthogonal Channel Allocation," 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, 2018, pp. 940-945.
- [24] M. M. Chitlange and V. S. Deshpande, "Effect of node density on congestion in WSN," 2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC), Pune, 2015, pp. 1-3.
- [25] M. Vadivel, A. Ali and V. G. Sivakumar, "A Study on Congestion control in WSN using Dynamic alternative path selection approach," 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), 2018 2nd International Conference on, Palladam, India, 2018, pp. 346-349.
- [26] M. Kaur, V. Verma and A. Malik, "A Comparative Analysis of Various Congestion Control Schemes in Wireless Sensor Networks," 2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), Noida, 2018, pp. 14-15.
- [27] O. J. Pandey and R. M. Hegde, "Low-Latency and Energy-Balanced Data Transmission Over Cognitive Small World WSN," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 8, pp. 7719-7733, Aug. 2018.
- [28] Q. Chen, H. Gao, Z. Cai, L. Cheng and J. Li, "Distributed Low-Latency Data Aggregation for Duty-Cycle Wireless Sensor Networks," in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 26, no. 5, pp. 2347-2360, Oct. 2018.
- [29] M. Rihan, M. El-Khamy and M. El-Sharkawy, "On ZigBee coexistence in the ISM band: Measurements and simulations," 2012 International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas, Clermont Ferrand, 2012, pp. 1-6.
- [30] B. Lu, Z. Qin, Y. Sun, J. Hu and L. Wang, "A Dynamic Self-Adapting Mechanism for ZigBee Performance Assurance Under Wi-Fi Interference," in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 9, pp. 3900-3909, 1 May1, 2018.
- [31] V. Gupta and S. De, "SBL-Based Adaptive Sensing Framework for WSN-Assisted IoT Applications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 6, pp. 4598-4612, Dec. 2018.

- [32] S. T. Hasson and A. A. R. Finjan, "A suggested angles-based sensors deployment algorithm to develop the coverages in WSN," 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, 2018, pp. 547-552.
- [33] A. Berger, M. Pichler, D. Ciccarello, P. Priller and A. Springer, "Characterization and adaptive selection of radio channels for reliable and energy-efficient WSN," 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, 2016, pp. 1-6.
- [34] T. Çöplü and S. F. Oktuğ, "Predictive channel access scheme for Wireless Sensor Networks using Received Signal Strength statistics," 2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, 2011.
- [35] S. Mori, "Receiver-side Cooperation Scheme with Interference Reduction for Wireless Sensor Networks," 2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), Singapore, 2019, pp. 1-5.
- [36] H. Bizagwira, J. Toussaint and M. Misson, "Multi-channel routing protocol for dynamic WSN," 2016 Wireless Days (WD), Toulouse, 2016, pp. 1-3.
- [37] BeomSeok Kim, Byoungseon Kim and Jinsung Cho, "An efficient channel scanning and selection scheme for multi-channel MAC protocols in WSNs," 10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014), Beijing, 2014.
- [38] S. V. Bhagate and S. Patil, "Maximizing spectrum utilization in cognitive radio network," 2017 International Conference on Big Data, IoT and Data Science (BIGDATA), Pune, 2017, pp. 82-90.
- [39] D. Sun, T. Song, B. Gu, X. Li, J. Hu and M. Liu, "Spectrum Sensing and the Utilization of Spectrum Opportunity Tradeoff in Cognitive Radio Network," in IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 12, pp. 2442-2445, Dec. 2016.
- [40] M. Yilmaz, D. G. Kuntalp and A. Fidan, "Determination of spectrum utilization profiles for 30 MHz–3 GHz frequency band," 2016 International Conference on Communications (COMM), Bucharest, 2016, pp. 499-502.
- [41] T. Nyasulu, D. H. Crawford and C. Mikeka, "Malawi's TV white space regulations:: A review and comparison with FCC and Ofcom regulations," 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, 2018, pp. 1-6.
- [42] S. Bhole, A. Rathod, S. Doddipalli, S. Kannaiyan and A. Kothari, "A Compact Planar Antenna with Meander lines for TV White Space Applications," 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, 2018, pp. 1-4.

- [43] E. E. A. Medina and S. E. Barbin, "Using Femtocells in TV White Space: Overview and Challenges," 2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018), Arequipa, Peru, 2018, pp. 1-4.
- [44] Hyung Min Chang, C. K. Huynh and W. C. Lee, "An efficient power allocation scheme for multiple TVWS devices based on the location probability," 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Vienna, 2016, pp. 22-24.
- [45] D. Kumar and K. Ramalakshmi, "Survey on Cognitive Wireless Sensor Network," 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 2018, pp. 1885-1889.
- [46] K. A. Yau, P. Komisarczuk and P. D. Teal, "Cognitive Radio-based Wireless Sensor Networks: Conceptual design and open issues," 2009 IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, Zurich, 2009.
- [47] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pages 102-114, August 2002.
- [48] C. Xin, P. Paul, M. Song and Q. Gu, "On Dynamic Spectrum Allocation in Geo-Location Spectrum Sharing Systems," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 18, no. 4, pp. 923-933, 1 April 2019.
- [49] M. A. Safwat, "Dynamic Spectrum Access with Traffic Prioritization in Cognitive Radio Networks", Network Planning Department, National Telecommunication Institute, Cairo, Egypt, IEEE, 2015.
- [50] T. V. Saroja and L. L. Ragha, "A dynamic spectrum access model for cognitive radio wireless sensor network," 2017 4th International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), Coimbatore, 2017.
- [51] M. B. Satria, I. W. Mustika and Widyawan, "Resource Allocation in Cognitive Radio Networks Based on Modified Ant Colony Optimization," 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST), Yogyakarta, 2018.
- [52] K. Sheelavant and R. Sumathi, "Interference and Delay Aware Routing Algorithm for Cognitive Radio Sensor Networks," 2017 2nd International Conference On Emerging Computation and Information Technologies (ICECIT), Tumakuru, 2017.
- [53] S. V. Nandury and B. A. Begum, "Smart WSN-based ubiquitous architecture for smart cities," 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Kochi, 2015, pp. 2366-2373.

- [54] C. A. Ramírez, R. C. Barragán, G. García-Torales and V. M. Larios, "Low-power device for wireless sensor network for Smart Cities," 2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC), Puerto Vallarta, 2016, pp. 1-3.
- [55] N. H. Bt Halim, N. B. Yaakob and A. Bin Awang Md Isa, "Congestion control mechanism for Internet-of-Things (IOT) paradigm," 2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED), Phuket, 2016.
- [56] V. Garcia-Font, C. Garrigues and H. Rifà-Pous, "An architecture for the analysis and detection of anomalies in smart city WSNs," 2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), Guadalajara, 2015, pp. 1-6.
- [57] S. Verma, R. Paulus, A. K. Jaiswal and N. Nitin, "An enhanced dynamic multilevel protocol (EDMP) for WSN," 2016 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), Noida, 2016, pp. 435-440.
- [58] M. Y. M. Alnaham and I. A. M. Abdelrahman, "Improving QoS in WSN Based on an Optimal Path from Source to Sink Node Routing Algorithm," 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCEEE), Khartoum, 2018.
- [59] Z. Tao, Y. Qin, H. Zhang, and S.-Y. Kuo, "A self-configurable power control algorithm for cognitive radio-based industrial wireless sensor networks with interference constraints," in Proc. IEEE ICC, 2012, pp. 98–103.
- [60] J. Lunden, V. Koivunen and H. V. Poor, "Spectrum Exploration and Exploitation for Cognitive Radio: Recent Advances," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 32, no. 3, pp. 123-140, May 2015.
- [61] R. G. Garroppo, L. Gazzarrini, S. Giordano, L. Tavanti, "Experimental assessment of the coexistence of Wi-Fi, ZigBee, and Bluetooth devices", IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2011.
- [62] E. U. Ogbodo, D. G. Dorrell and A. M. Abu-Mahfouz, "Improved Resource Allocation and Network Connectivity in CRSN Based Smart Grid for Efficient Grid Automation," 2019 Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS), Durban, South Africa, 2019.
- [63] C. Valdivieso, F. Novillo, J. Gomez and D. Dik, "Centralized channel assignment algorithm for WSN based on simulated annealing in dense urban scenarios," presented at 2016 8th IEEE Latin-American Conf. on Communications, Medellin, 2016.

- [64] H. Wang and L. Zhang, "An Improved Simulated Annealing Localization Algorithm for WSN," 2018 IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS), Singapore, Singapore, 2018, pp. 93-96.
- [65] W. Sun and L. Zhang, "WSN Location Algorithm Based on Simulated Annealing Co-linearity DV-Hop," 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, 2018, pp. 1518-1522.
- [66] A. A. M. Khalaf and M. S. A. Mokadem, "Effects of ZigBee component failure on the WSN performance with different topologies," 2016 28th International Conference on Microelectronics (ICM), Giza, 2016, pp. 9-12.
- [67] A. Mir and A. Khachane, "Sensing Harmful Gases in Industries Using IOT and WSN," 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), Pune, India, 2018, pp. 1-3.
- [68] S. H. R. Bukhari, S. Siraj and M. H. Rehmani, "PRACB: A Novel Channel Bonding Algorithm for Cognitive Radio Sensor Networks," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6950-6963, 2016.
- [69] P. M. Mwamba and M. Sumbwanyambe, "Evaluation of Energy Efficiency of IEEE 802.15.4 CR-WSN under Interfered Environment," 2019 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD), Winterton, South Africa, 2019, pp. 1-6.
- [70] I. Cushman, A. Younis and D. B. Rawat, "Experimental study of dynamic spectrum access for opportunistic mobile communications using USRP devices," 2016 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Austin, TX, 2016, pp. 151-154.
- [71] J. Agarkhed and V. Gatate, "Cognitive radio routing in wireless sensor networks — A comprehensive study," 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, 2017, pp. 1434-1439.
- [72] S. J., G. Y., S. A. S., C. K., A. R. and G. Raja, "Leaky Bucket based congestion control in Wireless Sensor Networks," 2018 Tenth International Conference on Advanced Computing (ICoAC), Chennai, India, 2018, pp. 172-174.
- [73] A. A. Kadam and P. N. Chatur, "Literature review of congestion avoidance system in wireless sensor network," 2016 Second International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICONSTEM), Chennai, 2016, pp. 120-124.
- [74] X. Zhang, D. Li and Y. Zhang, "Maximum Throughput under Admission Control with Unknown Queue-length in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Sensors Journal*, doi: 10.1109/JSEN.2020.2997984.

- [75] P. Chanak and I. Banerjee, "Congestion Free Routing Mechanism for IoT-enabled Wireless Sensor Networks for Smart Healthcare Applications," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, doi: 10.1109/TCE.2020.2987433.
- [76] G. Yildirim and Y. Tatar, "Simplified Agent-Based Resource Sharing Approach for WSN-WSN Interaction in IoT/CPS Projects," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78077-78091, 2018.
- [77] N. Pant, M. P. Singh and P. Kumar, "Traffic and resource based methods for congestion control in wireless sensor networks: A comparative analysis," 2014 IEEE 6th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST), Ota, 2014, pp. 1-6.
- [78] Shah, S.A. et al., "Congestion control algorithms in wireless sensor networks: Trends and opportunities", *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksuci.2015.12.005>
- [79] M. J. A. Jude and V. C. Diniesh, "DACC: Dynamic agile congestion control scheme for effective multiple traffic wireless sensor networks," 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, 2017, pp. 1329-1333.
- [80] J. Tan et al., "An Efficient Information Maximization Based Adaptive Congestion Control Scheme in Wireless Sensor Network," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 64878-64896, 2019.
- [81] W. Chen, Y. Niu and Y. Zou, "Congestion control and energy-balanced scheme based on the hierarchy for WSNs," in *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 1-8, 2 2017.
- [82] C. J. Raman & Visumathi James "FCC: Fast congestion control scheme for wireless sensor networks using hybrid optimal routing algorithm", Springer Link, Published: 13 January 2018.
- [83] M. Yu and X. Yang, "COO-MAC: A Novel Cooperative MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 1-4, Dec. 2018.
- [84] K. Cao, C. Dong and F. Yu, "Dynamic Time-slot Allocation Algorithm Based on Environment Sensing in Wireless Sensor Network," 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Wuxi, China, 2019, pp. 490-494.
- [85] A. Ullah and J. Ahn, "Performance evaluation of X-MAC/BEB protocol for wireless sensor networks," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 5, pp. 857-869, October 2016,
- [86] L. Zhang, S. Gao, K. Wei, W. Zhang and F. Yongxin, "Multi-channel allocation algorithm based on congestion avoidance in wearable wireless sensor network," 2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), Hualien, 2018, pp. 1-5.

- [87] R. M. Kittali, S. K. Mahabaleshwar and A. V. Sutagundar, "Congestion controlled adaptive routing in wireless sensor network," 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), Paralakhemundi, 2016, pp. 1528-1532.
- [88] S. Khan, T. S. S. Krishnan, S. Kothari, J. Ebenezer, K. Madhusoodanan and S. A. V. S. Murty, "Interference study in adjacent and alternate channels of IEEE 802.15.4 spectrum," 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, 2016.
- [89] "IEEE Approved Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks - Amendment: Higher Rate (2 Mb/s) Physical (PHY) Layer," in IEEE P802.15.4t/D06, November 2016, vol., no., pp.1-24, 1 Jan. 2016.
- [90] M. S. Iqbal, A. Masrub, V. M. Panneer Selvan and H. S. Al-Raweshidy, "A performance enhancement of IEEE 802.15.4 standard to overcome hidden nodes effect on low data rate ad hoc WSNs," Third International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH 2013), London, 2013, pp. 360-364.
- [91] A. Mondal, I. S. Misra and S. Bose, "Building a low cost solution using wireless sensor network for agriculture application," 2017 International Conference on Innovations in Electronics, Signal Processing and Communication (IESC), Shillong, 2017, pp. 61-65
- [92] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks," in IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015) , vol., no., pp.1-800, 23 July 2020.
- [93] IEEE Draft Recommended Practice for Network Reference Model and Functional Description of IEEE 802 Access Network," in IEEE P802.1CF/D3.0 October 2018, vol., no., pp.1-183, 1 Nov. 2018.
- [94] S. K. Punia and F. Ziya, "Study on MAC Protocols and Attacks: A Review," 2019 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 2019, pp. 621-625.
- [95] A. Karthikeyann, V. P. Arunachalam, S. Karthik and P. Dhivya, "Energy Efficient Structure Free and Location Based Routing Protocol in WSN," 2018 International Conference on Soft-computing and Network Security (ICSNS), Coimbatore, 2018, pp. 1-5.
- [96] S. Pramono, A. O. Putri, E. Warsito and S. B. Basuki, "Comparative analysis of star topology and multihop topology outdoor propagation based on Quality of Service (QoS) of wireless sensor network(WSN)," 2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), Semarang, 2017, pp. 152-157.

- [97] M. Y. Sumthane and R. A. Vatti, "Wi-Fi interference detection and control mechanism in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," 2017 Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP), Shimla, 2017.
- [98] N. Azmi et al., "Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: A survey," 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED), Penang, 2014, pp. 403-408.
- [99] M. Pakparvar, H. Gharibdoust, S. Pollin and L. Tytgat, "Dynamic channel selection algorithms for coexistence of wireless sensor networks and wireless LANs," 2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Lyon, 2013, pp. 33-38.
- [100] G. v. Zengen, F. Buesching, W. Poettner and L. Wolf, "Adaptive Channel Selection for Interference Reduction in Wireless Sensor Networks," ARCS 2015 - The 28th International Conference on Architecture of Computing Systems. Proceedings, Porto, Portugal, 2015, pp. 1-7.
- [101] Y. Kim, H. Shin and H. Cha, "Y-MAC: An Energy-Efficient Multi-channel MAC Protocol for Dense Wireless Sensor Networks," 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008), St. Louis, MO, 2008, pp. 53-63.
- [102] V. E. Narawade and U. D. Kolekar, "Congestion avoidance and control in wireless sensor networks: A survey," 2016 International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG), Indore, 2016, pp. 1-5.
- [103] F. Li, K. Lam, X. Li, X. Liu, L. Wang and V. C. M. Leung, "Dynamic Spectrum Access Networks With Heterogeneous Users: How to Price the Spectrum?," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 6, pp. 5203-5216, June 2018.
- [104] Y. Yang, Q. Zhang, Y. Wang, T. Emoto, M. Akutagawa and S. Konaka, "Multi-strategy dynamic spectrum access in cognitive radio networks: Modeling, analysis and optimization," in China Communications, vol. 16, no. 3, pp. 103-121, March 2019.
- [105] Q. Zhao and A. Swami, "A Survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing and Networking Perspectives," 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07, Honolulu, HI, 2007. pp. IV-1349-IV-1352.
- [106] R. Coase, "The federal communications commission," J. Law and Economics, pp. 1-40, 1959.
- [107] D. Hatfield and P. Weiser, "Property rights in spectrum: taking the next step," in Proc. of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005.

- [108] L. Xu, R. Tonjes, T. Paila, W. Hansmann, M. Frank, and M. Albrecht, "DRiVE-ing to the Internet: Dynamic Radio for IP services in Vehicular Environments," in Proc. of 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, pp. 281 - 289, Nov. 2000.
- [109] W. Lehr and J. Crowcroft, "Managing shared access to a spectrum commons", First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005.
- [110] Torabi, N.; Wong, W.K.; Leung, V.C.M.; , "A robust coexistence scheme for IEEE 802.15.4 wireless personal area networks," Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE , vol., no., pp.1031-1035, 9-12 Jan. 2011.
- [111] Qing Zhao; Lang Tong; Ananthram Swami; Yunxia Chen, "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, April 2007.
- [112] J. Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio," Ph.D. dissertation, KTH Royal Inst. of Technol., Stockholm, Sweden, 2000.
- [113] Darpa xg-program. [Online]. Available: <http://www.darpa.mil/ato/programs/xg/>.
- [114] R. Saeed, "Cognitive Radio and advanced spectrum management," 2008 Mosharaka International Conference on Communications, Computers and Applications, Amman, 2008, pp. xii-xii.
- [115] E. Helal, A. Khattab and Y. A. Fahmy, "Energy-efficient cluster head selection for cognitive radio sensor networks," 2016 28th International Conference on Microelectronics (ICM), Giza, 2016, pp. 205-208.
- [116] R. Fatima, S. h. Tauseef and R. Khanam, "Energy Efficient Spectrum Access Design for Cognitive Radio Wireless Sensor Network," 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2019, pp. 6-11.
- [117] S. Akhila and K. P. Priya, "Dynamic channel access with asynchronous sleep-wake scheduling to improve energy efficiency in CRSNs," 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2), Coimbatore, 2017.
- [118] R. G. Gangambika and B. S. Pavan, "PSO and OLSR Based Protocol for Cognitive Radio Sensor Network," 2017 2nd International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solution (CSITSS), Bangalore, 2017.
- [119] I F. Akyildiz, W-Y Lee, M C. Vuran, S Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A Survey", Elsevier, 2006.

- [120] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in Proc. IEEE Int. Workshop Mobile Multimedia Communications, 1999, pp. 3–10.
- [121] H. A. Alcala Garrido, M. E. Rivero-Angeles and I. Y. Orea Flores, "Performance Analysis of a Wireless Sensor Network for Seism Reporting in an Overlay Cognitive Radio System," 2016 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), Crans-Montana, 2016, pp. 565-570.
- [122] M. Rahman and A. Saifullah, "Integrating Low-Power Wide-Area Networks in White Spaces," 2018 IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI), Orlando, FL, 2018, pp. 255-260.
- [123] M. A. Al-Jarrah, M. A. Yaseen and A. Al-Dweik, "Decision Fusion for Clustered WSNs over IoT Infrastructure using 1-bit Quantization," 2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), Ras Al Khaimah, United Arab Emirates, 2019.
- [124] C. Fan, S. Bao, Y. Tao, B. Li and C. Zhao, "Fuzzy Reinforcement Learning for Robust Spectrum Access in Dynamic Shared Networks," in IEEE Access, vol. 7, pp. 125827-125839, 2019.
- [125] 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, January 2013 , vol., no., pp.1-328, Feb. 5 2013.
- [126] R. Pinto, J. Pereira, H. da Rocha, R. I. Martin and A. Espírito-Santo, "A Discussion about the Implementation of a WSN to Industry 4.0 based on the IEEE 1451 Standard," 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, Finland, 2019.
- [128] S. Chantaraskul and C. Tanwongvarl, "Channel assignment with energy optimization in cognitive wireless sensor networks," 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, 2017, pp. 1-4.
- [129] J. D. Alejandrino, R. S. Concepcion, S. C. Laugico, E. T. Trinidad and E. P. Dadios, "Feasibility of Television White Space Spectrum Technologies for Wide Range Wireless Sensor Network: A survey," 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), Laoag, Philippines, 2019

- [130] 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", September 2010.
- [131] Medina, Washington; Novillo, Francisco; Chancay, Eduardo; Romero, Juan. 2020. "Mechanism to Estimate Effective Spectrum Availability Inside Smart Buildings." *Electronics* 9, no. 8: 1244.
- [132] Washington Medina, Francisco Novillo, Eduardo Chancay, Juan Romero-Arguello, Characterizing Effective Spectral Opportunities and Shadowing Influence Inside Large Buildings for Short Range CRWS Use, LATINCOM 2019.
- [133] Washington Medina, Francisco Novillo, Eduardo Chancay, Juan Romero-Arguello, Discovering Shadowing Effects Over Effective Spectrum Availability Inside Smart Buildings for Cognitive Short Range Systems Operation, IEEE SARNOFF 2019.
- [134] Ofcom, Implementing geolocation, November 2010.
<http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/geolocation/summary/geolocation.pdf>
- [135] O. Holland, "Some Are Born With White Space, Some Achieve White Space, and Some Have White Space Thrust Upon Them," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 2, no. 2, pp. 178-193, June 2016.
- [136] M. Cardei and A. Mihnea, "Channel assignment in cognitive wireless sensor networks," 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, 2014, pp. 588-593.
- [137] S. Byun, I. Balasingham and X. Liang, "Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Cognitive Sensor Networks: Improving Fairness and Energy Efficiency," 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference, Calgary, BC, 2008, pp. 1-5.
- [138] M. Askari, Y. S. Kavian, H. Kaabi and H. F. Rashvand, "A channel assignment algorithm for Cognitive Radio wireless sensor networks," IET Conference on Wireless Sensor Systems (WSS 2012), London, 2012, pp. 1-4.
- [139] D. Cavalcanti, S. Das, J. Wang and K. Challapali, "Cognitive Radio Based Wireless Sensor Networks," 2008 Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks, St. Thomas, US Virgin Islands, 2008, pp. 1-6.
- [140] F. Man and W. Lenan "Extension to Shannon's channel capacity—the theoretical proof," presented at 6th Int. Conf. on Information, Communications & Signal Processing, 2007.

- [141] H. Kim and J. Kim, "Energy-efficient resource management in wireless sensor network," presented at 011 IEEE Topical Conf. on Wireless Sensors and Sensor Networks, Phoenix, AZ, 2011.
- [142] S. Widodo, E. A. Pratama, S. Pramono and S. B. Basuki, "Outdoor propagation modeling for wireless sensor networks 2.4 GHz," 2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), Semarang, 2017, pp. 158-162.
- [143] SPUTNIK. (2004). RF Propagation Basis. 17 Febrero, 2020, de SPUTNIK, Website: https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA190/ch5_rf_propagation_basics%20SPUTNIK.pdf.
- [144] Skyworks. (2011). Extending 2.4 GHz ZigBee® Short-Range Radio Performance with Skyworks SKY65344/SKY65343 Front-End Modules. february 18, 2020, de Skyworks Solutions Inc. Website: <https://skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/501-600/201527A.pdf>.
- [145] K. Chimanga, J. Kalezhi and P. Mumba, "Application of best first search algorithm to demand control," 2016 IEEE PES PowerAfrica, Livingstone, 2016, pp. 51-55.
- [146] Carlos Valdivieso, Francisco Novillo, Aristóteles Amat, Alfredo Nuñez-Unda, "Heuristic Channel Assignment Mechanism for WSN in Congested ISM Bands Based on QoS," International Journal of Electrical and Electronic Engineering, & Telecommunications (IJEETC), Polonia, 2020.