



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
TELECOMUNICACIONES

MEJORAMIENTO DEL RE ÚSO ESPACIAL EN REDES

IEEE 802.11

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. EDWIN IVAN REYES PIÑA

TUTORES PRINCIPALES:

DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS
FACULTAD DE INGENIERÍA

DR. OSCAR ARANA HERNÁNDEZ F
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Mayo 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. GUTIÉRREZ CASTREJÓN RAMÓN

SECRETARIO: DR. GARCÍA JIMÉNEZ LUIS FRANCISCO

1^{er.} VOCAL: DR. GÓMEZ CASTELLANOS JAVIER

2^{do.} VOCAL: DR. ARANA HERNÁNDEZ OSCAR

3^{er.} VOCAL: DR. LÓPEZ GUERRERO MIGUEL

LUGAR O LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:
CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

TUTOR DE TESIS:
DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco nuevamente a mi señor mi Dios, por bendecid a mi familia y personas que forman parte de mi entorno, por la salud, amor y bienestar que disfrutamos durante nuestra vida.

A mi familia por su apoyo incondicional y desinteresado, por todos los sacrificios y esfuerzos constantes. A mis padres porque a través de sus consejos logre forjar un camino, guiarme y alentarme ante los obstáculos que se presentaron para lograr el éxito como profesionista.

A mi hermano Erick por estar a mi lado y contar siempre con todo su apoyo ante cualquier circunstancia.

A mi tío Daniel por todo el apoyo durante toda mi trayectoria como estudiante y como persona que me permitió llegar hasta este punto.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, a todos los profesores que durante mi estancia compartieron sus conocimientos y experiencia en las aulas para culminar este trabajo.

Agradezco especialmente al Dr. Javier Gómez Castellanos por su esmero y dedicación a esta tesis, así como al Dr. Oscar Arana Hernández por ser cotutor de esta tesis, a ambos por todo su apoyo incondicional, tiempo y paciencia a lo largo de esta etapa.

Por ultimo agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca mensual recibida durante la duración del posgrado. De igual manera agradezco el apoyo recibido por parte del proyecto DGAPA-PAPIIT IN119820.

Índice general

1. Introducción	10
1.1. Definición del problema	12
1.2. Hipótesis	12
1.3. Metas	13
1.4. Metodología	13
1.5. Contribución	14
1.6. Descripción del contenido	14
2. Antecedentes	15
2.1. Marco teórico	15
2.1.1. Bandas ISM	15
2.1.2. Protocolo IEEE 802.11	15
2.1.3. Modelos de propagación	17
2.1.4. Modos de acceso MAC	19
2.1.5. <i>Throughput</i>	20
2.2. Estado del arte en las técnicas de selección de canal	21
2.3. Tabla comparativa de algoritmos en la literatura	24
3. Algoritmo de selección de canal	26
3.1. Métricas de equidad (<i>Fairness</i>)	26
3.2. Algoritmo de selección de canal	30
4. Algoritmos de selección de potencia y umbral de sensado	35
4.1. Problema de espacio de búsqueda	38
4.2. Algoritmo de una pareja	39
4.3. Algoritmo de dos parejas	43
4.4. Algoritmo de tercias	47
5. Pruebas y resultados	51
5.1. Simulador Komondor	51
5.2. Pruebas para el algoritmo de selección de canal	52
5.3. Pruebas para los algoritmos de potencia de transmisión y umbral de sensado	58
6. Conclusiones	69

Índice de figuras

1.1. Diagrama de distribución de los canales.	11
3.1. Gráficas de rendimiento de Jain's index	27
3.2. Gráficas de rendimiento de distancia normalizada	28
3.3. Gráficas de rendimiento de métricas	29
3.4. Distancias entre vecinos	30
3.5. Topología y tabla de vecinos	32
3.6. Iteraciones del cambio de canal	33
4.1. Comparativa de <i>throughput</i> debido al cambio de los parámetros potencia de transmisión y umbral de sensado.	36
4.2. Comparativa de <i>throughput</i> debido al cambio de los parámetros potencia de transmisión y umbral de sensado.	37
4.3. Topología y tabla de vecinos	39
4.4. Ejemplo de operación del algoritmo de una pareja.	41
4.5. Topología y tabla de vecinos	43
4.6. Ejemplo de operación del algoritmo de dos parejas.	45
4.7. Topología y tabla de vecinos	47
4.8. Ejemplo de operación del algoritmo de tercias.	49
5.1. Gráfica comparativa de <i>throughput</i> para los escenarios	55
5.2. Gráfica de resultados del algoritmo de cambio de canal	57
5.3. Resultados del experimento de nueve AP	61
5.4. Resultados del experimento de 12 AP	64
5.5. Resultados del experimento de 15 AP.	67

Índice de tablas

2.1.	Tabla de frecuencias de los canales	17
2.2.	Tabla comparativa de algoritmos en la literatura	25
4.1.	Tabla del número de combinaciones	38
5.1.	Tabla de distancias de experimentos	59
5.2.	Tabla de resultados para el experimento de 9 AP	59
5.3.	Tabla de distancias de los experimentos	62
5.4.	Tabla de resultados para el experimento de 12 AP	62
5.5.	Tabla de resultados para el experimento de 15 AP	65

Índice de algoritmos

1.	Algoritmo de selección de canal	34
2.	Algoritmo de una pareja	42
3.	Algoritmo de dos parejas	46
4.	Algoritmo de tercias	50

Resumen

Las redes inalámbricas han alcanzado una gran popularidad en los últimos años. Una de las tecnologías inalámbricas con mayor uso es la basada en el estándar IEEE 802.11, comercialmente conocida como Wi-Fi. El espectro radioeléctrico en el que trabaja este estándar es reducido debido a que se trata de bandas de frecuencia que operan sin licencia. Además de Wi-Fi, otros dispositivos, como hornos de microondas y Bluetooth, operan en las mismas bandas y pueden generar interferencias. Es por ello que elegir adecuadamente el canal de operación de cada punto de acceso Wi-Fi puede mejorar el aprovechamiento de este recurso limitado.

Una de las características destacables de Wi-Fi es que los canales de frecuencia disponibles se superponen parcialmente. Por ejemplo, en la banda de frecuencia de 2.4 GHz de los 13 canales disponibles (dependiendo de la región del mundo este número puede ser diferente) solo un subconjunto de ellos no se superpone (canales ortogonales).

Dentro de la literatura especializada existen diversas propuestas para utilizar eficientemente el espectro disponible. En esta tesis se presentan dos algoritmos que mejoran el desempeño de los AP bajo el estándar Wi-Fi. En la primera etapa se presenta un algoritmo de selección de canal que considera solo a los vecinos más cercanos haciendo uso de los canales ortogonales disponibles. En la segunda etapa se propone un algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensado que también considera solo a sus vecinos más cercanos.

A diferencia de otros algoritmos en la literatura que consideran todos los AP de la red al mismo tiempo (lo cual incrementa de manera significativa el espacio de búsqueda, el tiempo de convergencia y la estabilidad del sistema), los dos algoritmos introducidos en esta tesis convergen rápidamente y no presentan inestabilidades. Más aún, se muestra que la configuración final de cada AP obtenida con los algoritmos propuestos es cercana a la configuración óptima de la red si se exploraran todas las combinaciones posibles (fuerza bruta).

Abstract

In the last decades, wireless networks have become very popular. The standard IEEE 802.11, commercially known as Wi-Fi, is one of the most widespread wireless technologies. Wi-Fi operates on unlicensed frequency bands denominated ISM (Industrial, Scientific, and Medical). The conditions of operation of these bands are complicated since devices such as microwave ovens and Bluetooth share the same spectrum. The coexistence of such devices with Wi-Fi generates saturation and scarcity of the radio spectrum. Moreover, the exponential use of Wi-Fi solutions for residential and small business Internet access aggravates saturation conditions.

One of the most remarkable features of Wi-Fi is that it subdivides the ISM band into partially overlapped channels. For instance, in the 2.4 GHz frequency band, IEEE 802.11 standard defines 13 available channels (depending on the region of the world, this number may be different), and only a subset of them do not overlap. These non-overlapping channels are denominated orthogonal channels. To overcome the saturation of the ISM bands, the specialized literature has demonstrated that selecting an appropriate operating channel can improve the use of this limited resource. In particular, several proposals suggest optimization algorithms that find approximate solutions (in terms of Wi-Fi channel distributions) that maximize the wireless network performance. In contrast to previously proposed algorithms, this thesis considers transmission power and carrier sensing threshold in addition to channel assignment to maximize the performance of Wi-Fi networks operating under radio saturation conditions. First, we present the proposal of a distributed channel selection algorithm. The main feature of this algorithm is that it considers the two nearest neighbors to obtain a near-optimal channel distribution. Then, the second part proposes a distributed algorithm to select near-optimal transmission power and carrier sensing threshold values. Finally, the evaluation of these algorithms was carried out through extensive simulations.

Capítulo 1

Introducción

Las comunicaciones inalámbricas tienen un papel importante en las actividades que desempeñamos diariamente. Las aplicaciones actuales nos permiten compartir información, imágenes, video y contenido multimedia mediante dispositivos móviles (p. ej.: laptops, smartphones y tablets) que cuentan con acceso a Internet de manera inalámbrica. Una de las tecnologías que permiten esto es el estándar IEEE 802.11. Este estándar, definido por la *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), contiene especificaciones de distintas redes inalámbricas. Por ejemplo, velocidades de transmisión, áreas de cobertura, modulación y codificación entre otras. En 1997, como parte de una campaña publicitaria, la Wi-Fi Alliance utilizó el eslogan “*The Standard for Wireless Fidelity*” (el estándar para la fidelidad inalámbrica), con el objetivo de crear una marca y asociar esta tecnología a un conjunto de protocolos y *hardware* de red inalámbrica. Por esta razón, le asignó el nombre “Wi-Fi” para con ello garantizar la compatibilidad entre los dispositivos que cuenten y cumplan con el estándar IEEE 802.11. Actualmente este estándar tiene distintas versiones, comenzando por la 802.11 original, pasando por las versiones más destacadas como A, B, E, G, N, P, AC, AX, AD donde se definen diferentes tipos de modulación, ancho de banda y la frecuencia de operación.

El protocolo IEEE 802.11 opera en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) definida por la ITU-R. Esta parte del espectro radioeléctrico está destinada para aplicaciones que no requieren una licencia de uso exclusivo. Debido a esta condicionante, los dispositivos pueden usar este espectro siempre y cuando limiten su potencia de transmisión, para coexistir con distintos dispositivos. Esto significa que los radios IEEE 802.11 entran en competencia con teléfonos inalámbricos, intercomunicadores y hornos de microondas.

Las redes 802.11 están compuestas de clientes (como laptops, smartphones y tablets) y de una infraestructura llamada *Access Points* o Puntos de Acceso (AP), que se encuentran en diferentes ubicaciones. Estos dispositivos se conectan a la red cableada, mediante la cual proveen el servicio de conexión a Internet, creando así una red inalámbrica de área local (WLAN). Las redes 802.11 pueden ser usadas en dos modos. La primera y más popular es el modo infraestructura, comunicando clientes a otras redes. En esta forma, toda la comunicación entre clientes deberá llevarse a cabo mediante el punto de acceso. El cliente envía y recibe sus paquetes a través del punto de acceso. También es posible que los clientes dentro del rango del radio se comuniquen de forma directa, por ejemplo, dos computadoras sin punto de acceso, a este arreglo se le denomina red Ad hoc.

Todas las técnicas de 802.11 utilizan radios de mediano alcance para lograr la transmisión de señales en las bandas de frecuencias ISM de 2.4 GHz y 5 GHz. Estas bandas tienen la ventaja de ser usadas sin licencia, por tanto están disponibles para cualquier transmisor que desee usarlas, siempre y cuando cumpla con ciertas restricciones como potencia radiada inferior a 1 W (siendo 50 mW el valor típico para transmisores de radio LAN inalámbricos). Debido a este hecho, otros dispositivos como teléfonos inalámbricos y hornos de microondas compiten directamente con los radios 802.11 por estas frecuencias.

Para América, el protocolo 802.11 tiene disponibles 11 canales, mientras que para Europa son 13 canales. Una de las particularidades de 802.11 es su ancho de banda de 22 MHz. Los canales están separados entre sí por 5 MHz, pero generalmente se dan cifras de 20 MHz para los canales de Wi-Fi, este ancho de banda de 20/22 MHz y la separación de canales de 5 MHz significa que los canales adyacentes se superponen y las señales de los canales adyacentes se interfieren entre sí.

En la figura 1.1 se muestra la distribución de canales, en esta es posible notar que existe un máximo de tres canales que no se superponen, por tanto, si hay redes que están compuestas de múltiples puntos de acceso que necesitan funcionar en canales que no interfieran, solo existe la posibilidad de usar tres canales. Este diagrama muestra la distribución de los canales, donde se puede ver que los canales de Wi-Fi (1, 6, 11) o (2, 7, 12) pueden ser utilizados como conjuntos de canales ortogonales.

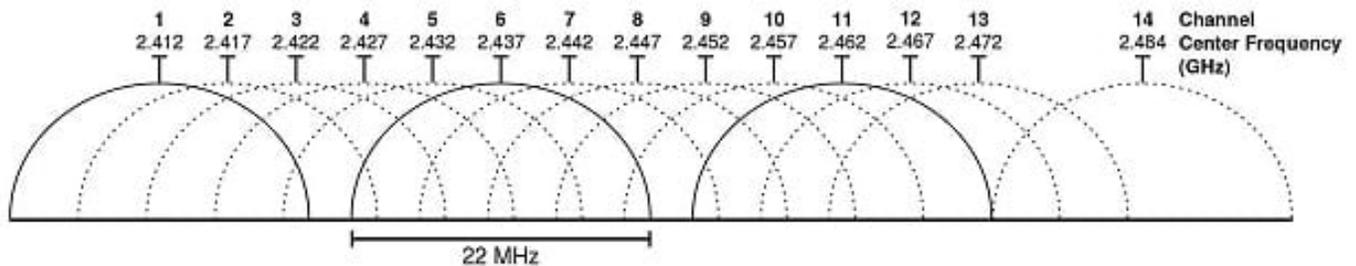


Figura 1.1: Diagrama de distribución de los canales.

Al ser instalados, los puntos de acceso van a coexistir con otros puntos de acceso y se van a interferir mutuamente, esta interferencia se denomina interferencia cocanal. Esta ocurre cuando dos o más dispositivos comparten la misma frecuencia de operación. A pesar de esto, podría no considerarse como una interferencia, sino más bien como una congestión, por el hecho de que muchos de ellos generalmente comparten el mismo canal. La sobrepoblación de estos dispositivos deriva en problemas de rendimiento, esto debido a la interferencia cocanal, por lo que es necesario buscar soluciones que optimicen el rendimiento en términos de transferencia de datos con el uso de una adecuada asignación de canales.

1.1. Definición del problema

En los últimos años se ha visto un explosivo crecimiento de redes que utilizan el protocolo 802.11, lo que se traduce en una alta densidad de dispositivos en distintos entornos, principalmente urbanos. Cada vez es más frecuente encontrar puntos de acceso en grandes cantidades, establecidos juntos en un área geográfica limitada (p. ej.: conjuntos de departamentos y fraccionamientos). Estos entornos generan problemas de sobrepoblación y con ello solapamientos de los canales entre los AP vecinos, lo cual degrada y perjudica el rendimiento de la red.

El protocolo 802.11 está diseñado para operar en frecuencias específicas, estas frecuencias son los canales de operación. Dentro del conjunto de estos canales, los canales denominados como ortogonales pueden ser usados para evitar interferencias entre dos señales (interferencia cocanal).

Una característica importante de los radios 802.11 es el uso de CSMA/CA. El uso de este protocolo de acceso al medio determina una sensibilidad de recepción, que es el nivel de potencia mínimo para mantener una conexión inalámbrica. También determina el CCA (*Clear Channel Assessment*), que es un mecanismo para determinar si el medio está inactivo o no. El mecanismo de detección de portadora es una medida sencilla de la intensidad de la señal recibida, si está por encima de cierto nivel se considera que el canal inalámbrico está ocupado.

Modificar la potencia de transmisión, así como el umbral de sensado de portadora (también es posible encontrar el termino monitorización, en lugar de sensado), le permiten a un AP modificar su desempeño. El reducir la potencia de transmisión, por ejemplo, reduce en gran medida el nivel de interferencia generado por un AP a otros AP cercanos. Por otro lado, modificar el umbral de sensado puede mejorar las oportunidades de transmisión de un AP. Por ejemplo, consideremos el caso en el que dos AP se encuentran a una distancia tal que no pueden comunicarse entre si, pero la potencia recibida es suficiente para causar interferencia. En este caso, aumentar el umbral de sensado podría permitir la transmisión simultánea.

Considerando las características propias del protocolo IEEE 802.11, existe una problemática relacionada con el número de puntos de acceso existentes en determinados entornos, como una ciudad o un conjunto de departamentos. En donde cada punto de acceso tenga configuraciones distintas. Para ejemplificar esto, en una red compuesta por tres AP, cada uno de ellos podría tener 12 configuraciones posibles. Cada configuración se refiere a un canal ortogonal de tres posibles, una potencia de transmisión de dos posibles, y un nivel de umbral de sensado de dos posibles. Dichos parámetros son valores propios del estándar IEEE 802.11. Esto significa que existen $12^3=1728$ configuraciones diferentes de una red con tres AP. Sin embargo, conforme aumenta el número de nodos en la red, el número de configuraciones crece de manera exponencial. Del ejemplo anterior correspondería un crecimiento de la forma 12^N , en donde N es el número de nodos en la red. En un espacio de búsqueda tan grande no es posible experimentar todas las configuraciones, por lo que es necesario el desarrollo de algoritmos que permitan reducir de manera inteligente el espacio de búsqueda y a la vez permitan encontrar una configuración que mejore el desempeño de la red.

1.2. Hipótesis

Para un AP, el impacto de la configuración que elijan sus vecinos disminuye con la distancia. Un subconjunto del espacio de búsqueda que considere únicamente a los vecinos más cercanos puede entonces contener al menos una solución cercana a la óptima global.

1.3. Metas

Meta general

La meta principal consiste en proponer algoritmos que aumenten el *throughput* promedio de las redes inalámbricas, en condiciones de alta densidad de puntos de acceso. Para ello, los algoritmos deben considerar la selección de parámetros tales como canal de comunicación, potencia de transmisión y umbral de sensado.

Metas particulares

- Estudiar el estado del arte para tener una perspectiva del campo de estudio y las propuestas de solución a la problemática principal, la sobrepoblación de AP y sus efectos.
- Proponer nuevos algoritmos para selección de canal, potencia de transmisión y umbral de sensado.
- Evaluar dichos algoritmos en un simulador.
- Reportar los resultados obtenidos en la presente tesis.

1.4. Metodología

El desarrollo de este trabajo está dividido en dos etapas. En la primera está el desarrollo de un algoritmo de selección de canal y la segunda etapa contempla el desarrollo de un algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensado. La razón de desarrollar un algoritmo que cambie de canal como primer objetivo es que separando en frecuencia cada uno de los puntos de acceso, el rendimiento obtenido de manera individual y general de la red se vería notablemente mejorado, debido a que la interferencia cocanal sería reducida lo más posible. El segundo algoritmo tiene motivo en minimizar el impacto que la potencia de transmisión tiene sobre los demás puntos de acceso; de igual manera modificar el umbral de sensado de portadora busca aumentar el número de transmisiones simultáneas posibles.

La razón de dividir en dos etapas la solución del problema es disminuir la complejidad del mismo reduciendo el espacio de búsqueda. En la primera etapa se considera únicamente la selección de canal, logrando una separación en frecuencia de los AP. Realizado lo anterior, se obtiene una topología de red donde la distancia entre AP en el mismo canal de frecuencia es la mayor posible, lo cual reduce la interferencia al máximo entre AP y presenta el mejor de los escenarios para la aplicación de los algoritmos de potencia de transmisión y umbral de sensado.

En un sentido estricto, se podría intentar resolver el problema en una sola etapa considerando selección de canal, potencia de transmisión y selección de umbral de sensado todo a la vez. Sin embargo, hacerlo de esta forma resulta en un espacio de búsqueda desmesurado en comparación con dividir la solución del problema en dos partes.

Primera etapa

Desarrollo de un algoritmo de selección de canal que como principal característica considera la distancia existente entre los puntos de acceso para asignarles un nuevo canal de operación. Este algoritmo se evalúa bajo diferentes escenarios y variando la densidad de los AP. También se realizaron experimentos con parámetros característicos del protocolo IEEE 802.11.

Segunda etapa

Desarrollo de un algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensado, que considera también la distancia entre los puntos de acceso para determinar la mejor configuración de las dos variables mencionadas. Este algoritmo es evaluado en diferentes escenarios y con distintas densidades de AP. La principal característica de este algoritmo es el poder modificar los parámetros de potencia de transmisión y umbral de sensado de portadora para encontrar una configuración que resulte en una mayor eficiencia de cada AP en particular y de la red en su conjunto.

1.5. Contribución

La contribución en este trabajo consta de dos algoritmos que, en conjunto, proponen una solución al problema de la interferencia cocanal debido a la sobrepoblación de puntos de acceso. Estos tienen por característica principal el uso de una métrica simple que es la distancia existente entre los 2 puntos de acceso más cercanos a este. El primero algoritmo tiene el objetivo de resolver la parte de asignación de canales, mientras que el segundo algoritmo involucra los parámetros de potencia de transmisión y umbral de sensado de canal, donde la característica más importante es también la distancia entre puntos de acceso para la selección de los parámetros mencionados.

1.6. Descripción del contenido

El contenido de la presente tesis se organiza de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se presentan los antecedentes que tienen relación directa con el desarrollo de este trabajo, tales como artículos de investigación enfocados a resolver el problema de selección de canal.
- El capítulo 3 presenta el algoritmo de selección de canal desarrollado durante este trabajo, así como una descripción de su funcionamiento.
- El capítulo 4 está enfocado en el algoritmo de cambio de potencia de transmisión y umbral de sensado.
- El capítulo 5 presenta los experimentos desarrollados a lo largo de la elaboración de esta tesis, así como gráficas de resultados de cada algoritmo para evaluar su rendimiento y eficiencia.
- El capítulo 6 presenta las conclusiones generales, así como la verificación de la hipótesis propuesta.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Marco teórico

2.1.1. Bandas ISM

Dentro del espectro radioeléctrico están reservadas, en determinados rangos, bandas de frecuencia para uso ISM, esto se refiere a industrial, científico y médico (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*). Estas bandas son de uso libre y cuentan con pocas restricciones de uso, todo ello en conformidad al reglamento y las normas establecidas por la ITU-R. Las restricciones enfatizan sobre todo la máxima potencia radiada permitida. Estas bandas suelen ser las mismas en todos los países, pero en algunos de ellos algunas bandas no existen y otras no tienen el mismo ancho de banda. Ejemplos de bandas ISM son las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz. En la primera es donde radian los hornos de microondas, en ambas frecuencias operan los dispositivos Wi-Fi. En la banda de 2.4 GHz, en Europa existen dos canales más, además de los 11 canales presentes en los Estados Unidos de América.

2.1.2. Protocolo IEEE 802.11

Las tecnologías de comunicación inalámbricas basadas en IEEE 802.11 se encuentran masivamente implementadas y distribuidas en el mercado. Estas se pueden encontrar en distintas áreas, por ejemplo, puntos de acceso, redes de malla urbana y sistemas de transporte, pero también en la mayoría de los dispositivos de comunicación móviles, como smartphones, laptops, tablets, etc. Todos ellos están equipados con adaptadores 802.11 a/b/g/n compatibles [1].

El estándar de red inalámbrica IEEE 802.11 fue desarrollado para generar una red inalámbrica de área local (WLAN). Dicho estándar cubre la subcapa MAC y la capa física (PHY) en la pila de protocolos de referencia OSI para arquitecturas de red. La subcapa MAC especifica un conjunto de reglas que definen la manera en la que se accede al medio y se envían datos. También define los procedimientos que hacen posible que los distintos dispositivos compartan el uso del espectro radioeléctrico. La capa física especifica el esquema de modulación utilizado, así como las características de señalización para la transmisión a través de radiofrecuencia [2].

Versiones del estándar

El estándar IEEE 802.11 original permite obtener una velocidad de transmisión de 1 Mbps a 2 Mbps. Este estándar se ha modificado a lo largo de los años para adaptarse a los requerimientos cada vez mayores de velocidad de transmisión y transferencia de datos. A continuación, se presentan las versiones más significativas del estándar junto con sus principales características.

1. IEEE 802.11: Este es el estándar original, actualmente se considera obsoleto. Este define tres tecnologías de capa física: Infrarrojo y dos formas de modulación de espectro expandido: FHSS

(*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). También se definen tasas de transferencia de 1 Mbps a 2 Mbps en la banda de 2.4 GHz utilizando un ancho de banda de 20 MHz.

2. IEEE 802.11A: Este estándar fue publicado años más tarde, alcanza una velocidad máxima de transferencia de 54 Mbps mediante la técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), ocupa un ancho de banda de 20 MHz en la banda de 5 GHz, debido a esto tiene menor interferencia que la banda de 2.4 GHz, pero con la deficiencia de alcanzar una menor cobertura. Presenta modulación adaptativa que depende directamente de las características del canal utilizado.
3. IEEE 802.11B: Este estándar fue creado en 1999, opera en la frecuencia de 2.4 GHz y utiliza la técnica de DSSS con CCK (*complementary code keying*), su ancho de banda es de 20 MHz y logra alcanzar una tasa de transferencia de datos de hasta 11 Mbps.
4. IEEE 802.11G: Este estándar fue publicado en el 2003, utiliza la banda de 2.4 GHz, permitiendo de esta forma tener compatibilidad con el estándar anterior (B), tiene un ancho de banda de 20 MHz y ocupa ambas técnicas: DSSS y OFDM, también utiliza modulación adaptativa que le permite alcanzar velocidades de hasta 54 Mbps.
5. IEEE 802.11N: Este estándar fue publicado en el 2009, opera tanto en la banda de 2.4 GHz así como en la de 5 GHz. Además de ocupar los 20 MHz de ancho de banda tradicional, utiliza también un ancho de banda de 40 MHz, que le permite alcanzar mayores velocidades de transferencia, tiene un máximo teórico de 150 Mbps y 600 Mbps. Esto se logra gracias a la introducción de la técnica MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*). Es compatible con las versiones anteriores “A”, “B” y “G”.
6. IEEE 802.11AX: Este estándar publicado en 2014, es la sexta generación de este estándar inalámbrico, incluye nuevas mejoras que le permiten obtener mejores velocidades de transmisión. Esta versión está diseñada para operar en un entorno de alta saturación del espectro. Una de las características más importante es el reuso espacial de frecuencia, esta tecnología denominada como BSS coloring, es un método para abordar la sobrecarga de contención media, mediante el “coloreo” del BSS, que tiene como objetivo identificar de forma única los diferentes BSS aunque estén transmitiendo en un mismo canal. También está provisto de MU-MIMO (Multi-User), en este caso está optimizado para ser usado como *Uplink* y *Downlink*. Respecto a las frecuencias en las que opera, es la clásica 2.4 GHz y la de 5 GHz, pero también se puede permitir operar en cualquier banda disponible entre 1 y 6 GHz. Todas estas nuevas características le permiten obtener velocidades de transmisión elevadas, de hasta un máximo de 10 Gbps, así como también promete mejorar las latencias en un 75 %.

Canales de 802.11 en 2.4 GHz

Existen un total de 14 canales definidos para su uso en la banda ISM de 2.4 GHz. No todos los canales de Wi-Fi están permitidos en todos los países, solamente 11 canales están permitidos por la FCC (*Federal Communications Commission*) y se utilizan en lo que a menudo se denomina “Dominio norteamericano”, y 13 canales están permitidos en Europa, donde los canales están definidos por la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*).

El estándar 802.11 especifica un ancho de banda de 22 MHz y el inicio de cada canal se ubica con 5 MHz de separación entre cada uno. Comúnmente se dan cifras nominales de 20 MHz para los

canales Wi-Fi. El ancho de banda 20 MHz/22 MHz y la separación de 5 MHz significa que los canales adyacentes se superponen y las señales de los canales adyacentes interfieren entre sí.

La siguiente tabla proporciona las frecuencias para un total de catorce canales Wi-Fi 802.11 disponibles en todo el mundo. No todos estos canales están disponibles para instalaciones Wi-Fi.

NÚMERO DE CANAL	MHz DE BAJA FRECUENCIA	FRECUENCIA CENTRAL MHz	FRECUENCIA SUPERIOR MHz
1	2401	2412	2423
2	2406	2417	2428
3	2411	2422	2433
4	2416	2427	2438
5	1421	2432	2443
6	1426	2437	2448
7	2432	2442	2453
8	2436	2447	2458
9	2442	2452	2463
10	2446	2457	2468
11	1451	2462	2473
12	2456	2467	2478
13	2461	2472	2483
14	2473	2484	2495

Cuadro 2.1: Tabla de frecuencias de los canales

2.1.3. Modelos de propagación

Un modelo de propagación es una expresión matemática utilizada para representar las características de propagación de una señal electromagnética en un entorno en particular. La señal emitida por una antena (transmisora) sufre diversos fenómenos como atenuación, absorción, ruido o reflexión en su trayecto por el medio de propagación, y sólo una pequeña fracción de ella llega al receptor. La ruta entre el receptor y el transmisor puede cambiar de varias maneras debido a la presencia de obstáculos. Esto hace que sea muy difícil estimar la señal recibida en un lugar determinado. Los modelos de propagación se han centrado tradicionalmente en estimar la potencia media de la señal recibida, así como los cambios de potencia recibida en la proximidad espacial de ubicaciones específicas.

Los modelos de propagación de radio se pueden clasificar en dos tipos principales: modelos *outdoors* (exteriores) y modelos *indoors* (interiores). Considerando el tamaño de la zona de cobertura, los modelos *outdoors* se pueden dividir en modelos de propagación de zonas grandes (macrocelas) y de zonas pequeñas (microcelas). Existen más modelos de propagación para sistemas inalámbricos *outdoors*. Los modelos *outdoors* no toman en cuenta las características particulares de la propagación *indoors* [3].

La mayoría de los modelos de cobertura de redes inalámbricas existentes son modelos de caja negra, los parámetros del modelo se ajustan y los resultados de cobertura se obtienen aplicando directamente la fórmula. Por ejemplo, se citan los siguientes artículos [4] y [5].

Propagación y Cobertura de Wi-Fi

La propagación y cobertura del estándar IEEE 802.11 depende de muchos factores que afectan directamente cuando se trata de analizar estos parámetros. El entorno en el que se encuentran los puntos de acceso suele estar lejos de ser el ideal. Las señales de Wi-Fi sufren de interacción con muchos objetos que se encuentran en el entorno y que frecuentemente forman parte del mismo lugar donde están, por ejemplo muros, elementos estructurales, muebles, ventanas, objetos decorativos; y de hecho cualquier objeto que esté dentro del medio ambiente tendrá un efecto a la propagación

y cobertura de la señal. Para garantizar el mejor desempeño de dispositivos con dicho estándar al momento de ser instalados y puestos en operación, es necesario realizar una adecuada planificación y dimensionamiento, donde el enfoque principal está en la radio-propagación y la estimación del área de cobertura de los AP.

Modelos de propagación LOG normal

Los modelos de propagación proporcionan promedios estadísticos de pérdida de potencia de señal en función de la distancia y parámetros generales del entorno, el emisor y el receptor. Con parámetros establecidos, las características de la señal recibida varía en el tiempo y el espacio de una forma difícil de predecir con exactitud. Por esta razón es importante considerar la señal como un proceso estocástico; las propiedades de este proceso proporcionan información útil para el diseño de una red.

La potencia recibida fluctúa en torno a la pérdida por los modelos de pérdidas media debido a dos fenómenos que se pueden tratar independientemente, el desvanecimiento por sombra (*Shadow Fading*) y desvanecimientos por multitrayecto (*multipath fading*).

Los desvanecimientos por multitrayecto son un fenómeno dinámico que se modela mediante procesos estocásticos. El desvanecimiento por sombra es más bien estático y se modela mediante una variable aleatoria denominada log-normal. (Ver gráfica 2.1 en libro de Goldsmith [6])

En el ámbito de comunicaciones, variables usuales de interés son potencias o razones de potencias (atenuación) cuyo comportamiento sigue una distribución log-normal.

Probabilidad de corte (*Outage probability*)

La atenuación por sombra tiene importantes repercusiones en el diseño de sistemas inalámbricos. Esto se debe a la propia naturaleza aleatoria de la potencia recibida. No es posible conocer con precisión hasta qué distancia del emisor se recibirá la señal con una potencia suficiente para permitir la comunicación.

Se llama probabilidad de corte (P_{out}) para una distancia d a la probabilidad de que la potencia recibida P_r , a esa distancia quede por debajo del umbral de recepción P_{min} .

$$P_{out}(P_{min}, d) = Prob \{P_r(d) < P_{min}\} \quad (2.1)$$

Con esta ecuación, la potencia recibida se puede descomponer en una potencia promedio y un término de atenuación por sombra

$$P_r(d) = \bar{P}_r(d) - \psi_{dB} \quad (2.2)$$

siendo $\bar{P}_r(d) = P_t - L_{dB}(d)$ (en unidades logarítmicas). Llamando $\Delta P(P_{min}, d) = \bar{P}_r(d) - P_{min}$ al margen, en dB, de la potencia promedio recibida sobre el umbral de detección podemos escribir la probabilidad de corte como:

$$P_{out}(P_{min}, d) = Prob \{\psi_{dB} > \Delta P(P_{min}, d)\} \quad (2.3)$$

Bajo el modelo log-normal, se debe comprobar que esta probabilidad es:

$$P_{out}(P_{min}, d) = Q \left(\frac{\Delta P(P_{min}, d)}{\sigma_{\psi_{dB}}} \right) \quad (2.4)$$

Donde $Q(z)$ es la probabilidad de que una variable $N(0, 1)$ sea mayor que Z [6], es decir:

$$Q(z) = \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.5)$$

2.1.4. Modos de acceso MAC

El acceso al medio inalámbrico se controla mediante funciones de coordinación. El estándar IEEE 802.11 establece tres tipos de coordinación de acceso al medio MAC.

- *Distributed coordination function* (DCF): Es el mecanismo básico de acceso al medio en el estándar 802.11. Este mecanismo hace uso del protocolo “*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*” (CSMA/CA) para coordinar el acceso al medio. Si una estación desea transmitir, primero escucha el canal y verifica si está ocupado, si es así, espera un tiempo aleatorio asignado por el algoritmo de demora *Exponential Backoff* y solo si el medio está libre después de consumir ese tiempo de espera, enviará su trama. De esta forma, el nodo que tenga el tiempo más pequeño de penalización ganará el medio. DCF puede o no utilizar el intercambio de paquetes de control para evitar colisiones, pero si lo utiliza, deberá verificar el correcto envío de datos a través del uso de una confirmación positiva (ACK).
- *Point coordination function* (PCF): Se utiliza en redes de infraestructura, lo que asegura que una estación central controle el envío de las tramas y de esta manera proporciona un medio sin contención.
- *Hybrid coordination function* (HCF): Esta función de coordinación es una combinación de las dos anteriores, con el objetivo de equilibrar los servicios dentro de una red inalámbrica. [7]

CSMA/CA

El estándar 802.11 utiliza un esquema CSMA (Acceso Múltiple por Detección de Portadora, del inglés *Carrier Sense Multiple Access*). CSMA es el mecanismo principal de acceso al medio del protocolo IEEE 802.11. Los términos de sensado de portadora y evasión de colisiones significan que cuando un AP desea transmitir un paquete, debe primero sensar el medio antes de hacerlo. Si el medio se encuentra inactivo, puede transmitir siempre y cuando su contador de tiempo aleatorio también se encuentre en cero. El tiempo aleatorio se asigna a cada nodo en el estándar después de la última transmisión. Esto último se hace para evitar justamente que dos o más nodos transmitan al mismo tiempo cuando sensen el canal inactivo. Dicho tiempo aleatorio será decrementando por cada nodo mientras el canal se encuentre inactivo por al menos la duración de un intervalo DIFS. Aún con este mecanismo es posible que ocurran colisiones, y en caso de ocurrir una, se duplicará el intervalo de tiempo en el cual se obtiene el tiempo aleatorio de espera para reducir todavía más la posibilidad de colisión en el siguiente intento [8].

Los radios 802.11 casi siempre son *half-dúplex*, lo cual significa que no pueden transmitir y escuchar al mismo tiempo en una sola frecuencia. La señal recibida puede ser miles de veces más débil que la señal transmitida, por lo cual no se puede transmitir y escuchar al mismo tiempo. Con Ethernet, una estación solo espera hasta que el medio queda en silencio y después comienza a transmitir. Si no recibe una ráfaga de ruido mientras transmite los primeros 64 bytes, es muy probable que se haya entregado la trama correctamente. En los sistemas inalámbricos este sistema de detección de colisiones no funciona.

2.1.5. *Throughput*

El *throughput* se define como la tasa de transferencia de datos sobre un enlace. Esta capacidad siempre es menor que la velocidad del enlace teórico. Junto con los datos, hay tráfico de negociación, mantenimiento y control del enlace. Depende además del protocolo de la capa de transporte que utiliza la aplicación, que puede ser TCP o UDP. El *throughput* es medido en bits por segundo y es una medida importante del desempeño de las redes en general.

Al realizar un análisis sobre un canal inalámbrico de una red IEEE 802.11, el *throughput* caracteriza el nivel de actividad y se define con la siguiente ecuación:

$$throughput_j = \frac{Tbit_{recibidos.j}}{T_{scan}} \quad (2.6)$$

donde T_{scan} es el tiempo de monitoreo sobre el canal j y $Tbit_{recibidos}$ recibidos es el total de bits recibidos. Con una distribución de canales inalámbricos adecuada, pudiera esperarse una desviación estándar pequeña entre la cantidad de tráfico recibido en los mismos, o lo que es igual, una distribución homogénea. Esta métrica puede ser aparente, porque no tiene en cuenta la velocidad de transmisión. Existe la posibilidad de transmitir una cantidad de datos a una razón de transmisión elevada y luego permanecer el canal desocupado. En otros casos, se transmite la misma cantidad de datos a menor velocidad durante el mismo intervalo de monitoreo ocupando mayor tiempo el canal. Estos dos casos expuestos muestran una cantidad de *throughput* similar, pero distinta ocupación de canal.

2.2. Estado del arte en las técnicas de selección de canal

Una meta particular establecida en este trabajo se enfoca en realizar un análisis de la problemática de la distribución eficiente del espectro radioeléctrico que permita optimizar el rendimiento de las redes 802.11. Esto hace necesario tener una visión y perspectiva más amplia en términos de optimización que considere las tendencias actuales de la utilización del espectro, así como los artículos académicos y de investigación que tratan este problema.

Artículos como [9], [10] y [11] muestran resultados de la separación en frecuencia de puntos de acceso. Asimismo, muestran como el mantener un adecuada administración de las redes inalámbricas incrementa la eficiencia de la red. Sin embargo, la existencia de una administración y gestión de los parámetros de las redes, es en algunos casos, nula.

Todos estos artículos presentan una solución técnica al problema de la asignación de canales en entornos adversos, no coordinados y no cooperativos.

La asignación de canales para puntos de acceso ha sido una práctica común entre usuarios finales, administradores y entusiastas de redes. Esta asignación tiene el objetivo de utilizar mejor el espectro radioeléctrico disponible. Particularmente los puntos de acceso tienen la capacidad opcional de seleccionar de forma automática su canal de operación para interferir lo menos posible entre puntos de acceso y por ende optimizar el rendimiento de la red, pero generalmente esto no es lo más eficiente ni adecuado [12].

Uno de los algoritmos comúnmente implementado en dispositivos AP, se denomina LCCS (*Least Congested Channel Search*) [13]. Dicho algoritmo fue diseñado para dispositivos de comunicación como puntos de acceso en redes inalámbricas. Este algoritmo se ejecuta de forma autónoma en cada punto de acceso; y busca el canal con la menor carga, esto es, el que tenga menor número de clientes. Una vez terminado este proceso, procede a cambiar al canal que encontró en esa búsqueda y opera en él. La razón de la poca utilización de este algoritmo, es que actualmente la implementación masiva de los puntos de acceso ha generado que los canales disponibles no sean suficientes para cubrir la demanda de canales que estos requieren. De igual manera, esto lo vuelve una manera poco eficiente de asignar los recursos del espectro que son utilizados para las transmisiones inalámbricas. También se debe a que el canal asignado por este algoritmo no necesariamente es el mejor a utilizar, puesto que solo considera la cantidad de usuarios que están conectados este. Tampoco considera ninguna métrica de distancia o potencia de transmisión para realizar una nueva asignación de canal.

Las investigaciones sobre el problema de la asignación de canales y el reuso espacial subdividen las redes en dos variantes; redes de administración centralizada y no centralizada, donde para el caso de una administración centralizada, en [14] se presenta un enfoque para las redes de modo infraestructura, donde hay dos elementos importantes, los AP (*access point*) y WD (*wireless devices*), donde los WD tienen que pasar toda la comunicación a través del AP. También presentan una técnica de asignación de canales que es *Simulated Annealing* (SA). Donde primeramente modelan la red como un grafo ponderado para asignar pesos a los nodos y posteriormente ejecutar el algoritmo SA. Esto para buscar en el espacio de solución durante cada iteración y decidir si pasar a un estado anterior o pasar a una frecuencia diferente. Utilizando un parámetro que denominan “temperatura”, mientras más temperatura tenga el nodo, más probable es que cambie de canal, esta temperatura disminuye conforme el algoritmo avanza para garantizar la convergencia. En el artículo, la forma principal de ejecución es de manera centralizada, lo cual es una limitante para puntos de acceso que no pertenezcan a la misma red. Por otro lado, el algoritmo propuesto en esta tesis es implementado de manera distribuida, lo que significa que puede tener una implementación extendida entre puntos de acceso de distintas redes.

La investigación del uso espectral para el estándar 802.11 en la banda de 2.4 GHz ha sido aplicada

a diferentes entornos y con estrategias mejor planteadas. Tal como el caso de D.J. Leith [15], donde proponen una nueva clase de algoritmo simple pero robusto para la distribución de canales, donde la comunicación entre los AP no es necesaria entre ellos para elegir un nuevo canal cuando se están interfiriendo. Este algoritmo se ejecuta de manera autónoma en cada uno de los puntos de acceso sin importar que los demás puntos de acceso se comuniquen, asimismo es la forma en que el algoritmo propuesto en este trabajo se ejecuta [15].

En [16] se expone que en las zonas urbanas la utilización de los AP está saturada y por ende, los usuarios quieren conectarse al AP con la mejor calidad de la señal. Más sin embargo, esto no significa que tenga mayor ancho de banda. Puesto que, si un AP tiene un alto RSSI, estarán conectados muchos usuarios, y es muy probable que no se obtengan los mejores resultados de ancho de banda y latencia esperados. Por otro lado, los usuarios también desean moverse y conectarse al mejor AP, pero mientras lo hacen, el objetivo es no perder comunicación y datos solicitados. La forma en que tratan de resolver la misma problemática es con un enfoque de una mayor/mejor intensidad de la señal que pueden ofrecer a los usuarios que estén conectados a este. Todo este proceso lo llevan sobre la capa física y MAC para realizar la distribución de usuarios, pero no consideran un cambio de canal o modificar los parámetros de potencia de transmisión o umbral de sensado para cada punto de acceso.

En [17] se propone una técnica avanzada para la selección dinámica y autónoma de canales, que utiliza el BSS (*Basic Service Set*) para saltar dinámicamente entre los canales y seleccionar el mejor. Las tres características más importantes que aporta este artículo son que el AP selecciona el BSS en un período de tiempo corto y el canal Wi-Fi menos ocupado sin interrupción del BSS. También identifican y seleccionan un conjunto de métricas muy sensibles en el control de acceso al medio (MAC) y capa física (PHY) que son protocolos que permiten una evaluación precisa y rápida de cuán disruptiva es la interferencia. Finalmente definen un protocolo simple para asegurar que todas las estaciones sigan correctamente el salto de BSS y puedan recuperar la sincronización en caso de que la pierdan.

La asignación de canales es un problema NP-Hard, donde muchos trabajos tratan de reducir la interferencia e incrementar el rendimiento. En [18] se propone un algoritmo simple y distribuido. Este algoritmo utiliza la información recopilada por cada uno de los AP, principalmente considera la interferencia producida por los AP en su entorno, cambiando de canal hasta encontrar la mínima interferencia. En un inicio consideran la topología de red como un grafo para evaluar la interferencia proveniente de los distintos AP cercanos. Es en este punto cada AP al ser encendido por primera vez, comienza a operar en un canal aleatorio, este canal pertenece a un conjunto de canales no superpuestos. Durante un tiempo definido, cada AP evalúa el *throughput* obtenido, mide la interferencia que ejercen sus clientes y la que cada AP inflige al estar en un canal determinado. Este proceso continúa cambiando de canal y midiendo la interferencia cada vez. Una vez que encuentra el canal con la menor interferencia, procede a cambiar a ese canal definitivamente. Este artículo presenta resultados alentadores, principalmente muestra una mejora en rendimiento y tiempo de convergencia al compararse contra el algoritmo LCCS. Siempre buscando la menor interferencia, todo esto sin comprometer la calidad del servicio mientras se ejecuta.

El crecimiento exponencial de las redes 802.11 exige por parte de los usuarios tener más y mejores servicios así como dispositivos que proveen la conectividad. Por esa razón, la IEEE continúa mejorando este protocolo, siendo la versión AX, una versión superior en muchos aspectos. En [19], se evalúan las características del algoritmo "*Dynamic Sensitivity Control*" (DSC) propio de esta nueva versión. El principio de este algoritmo es el ajustar dinámicamente el nivel de umbral de sensado de portadora (CST). El incremento de CST resulta en un mayor número de transmisiones simultáneas, pero al mismo tiempo resulta contraproducente debido a que los AP no siempre están en la posición adecuada. La idea básica de DSC es variar los niveles de CST en cada AP de forma distribuida. La manera

de lograrlo es mediante el envío de paquetes hacia el cliente conectado al AP, de esta manera recibe valores del nivel CST. Eso ejecuta durante un periodo de tiempo que permite calcular también el nivel RSSI para el cliente, de esta forma, el nivel de CST en el AP varía, ajustándose de acuerdo con lo reportado por su cliente. Finalmente se presenta una comparativa del rendimiento obtenido en términos de *throughput* del protocolo 802.11AX contra el 802.11 original. El algoritmo DSC permite transmisiones simultaneas aun con los distinto AP coexistentes, principalmente en entornos densos.

Recientemente, se ha abordado el problema de la reutilización espacial mediante algoritmos de aprendizaje automático. Por ejemplo, el trabajo propuesto por [20]. El enfoque principal de este artículo se basa en la asignación dinámica de canales (DCA), el control de transmisión de potencia (TPC), el ajuste del umbral de detección de portadora (CST) mediante el uso de *Multi-Armed Bandits* (MAB), un modelo de aprendizaje que busca maximizar las ganancias mientras explora múltiples objetivos [21]. La estrategia adoptada se enfoca en el aprendizaje que cada red inalámbrica puede obtener, basándose en el rendimiento obtenido a lo largo del tiempo. Por otro lado, evalúan el efecto que tiene en el aprendizaje individual de cada red al estar interactuando con otras redes cercanas, todo en términos de rendimiento y equidad alcanzados. En este trabajo de investigación se proponen dos estrategias de aprendizaje: concurrente y secuencial. En el primer caso, al término de cada iteración cada AP analiza el resultado obtenido de cierta configuración/acción, y con ello cuantificar qué tan buena ha resultado. Una vez que han terminado de actualizar sus “conocimientos”, continúan con una nueva acción. En la estrategia concurrente, los AP toman decisiones de manera simultánea y sincronizada, lo que propicia un ambiente más variable y caótico. El desempeño de cada acción se mide en términos de equidad y *throughput*, con ello pueden evaluar mejor qué tan robusta es una acción frente a un conjunto de acciones por parte de los demás AP. Cada una de las redes realiza esto de manera independiente, de igual manera utilizando el término egoísta para denotar que cada una de ellas buscar obtener el máximo rendimiento. Los resultados obtenidos por este artículo muestran que alcanzar un rendimiento máximo es posible en redes con alta densidad. Sin embargo, no está libre de problemas. Uno de los mencionados es la variabilidad de rendimiento temporal, que por el hecho de cambiar de configuración como respuesta al cambio por parte de las redes competidoras, se refleja en bajas tasas de rendimiento, también llegando a afectar la operación del protocolo TCP.

El uso de *Multi-Armed Bandits* (MAB) encuentra un área de oportunidad para implementar soluciones que permiten incrementar el reuso espacial. El uso de esta herramienta va enfocado en la selección de canal y el control de potencia de transmisión para redes inalámbricas. En [22] proponen una solución mediante el uso de estos MAB. Primeramente, modelan el problema propuesto a un modelo MP-MAB. MP-MAB (*Multiplayer Multi-Armed Bandits*) se refiere a una variante de MAB, donde existen múltiples “jugadores” y cada uno de ellos toma acciones y recibe recompensas en base a ellas. En este artículo, cada uno de los jugadores puede seleccionar un canal y un nivel de potencia de transmisión. También asumen que ninguno de los jugadores conoce las acciones tomadas por los demás, así como su canal o usuarios conectados. Otro supuesto es que las acciones tomadas por cada uno de estos puede ser completamente asíncrona por cada jugador. De esta manera, cada jugador busca maximizar su propia recompensa, donde en adición se tienen penalizaciones por el uso de potencia de transmisión muy alta. Para que finalmente, cada jugador y la red en general logren un equilibrio en la distribución de los recursos.

El uso de MAB trasladado al problema de reuso espacial resulta complejo, por el hecho de que MAB no considera estados generales, tampoco el problema de la interferencia puede ser abordado fácilmente por las interacciones complejas que tienen los nodos o redes inalámbricas.

Los artículos mencionados en esta sección muestran tanto los beneficios de utilizar los canales ortogonales, como la problemática del no aprovechamiento de los recursos disponibles por los puntos de acceso. Es importante denotar que existe una gran variedad de equipos con implementación del estándar IEEE 802.11 que operan como puntos de acceso, donde las soluciones presentadas en esta

sección, muchas veces involucran una complejidad elevada, lo que significa un gasto importante de recursos de procesamiento propios del punto de acceso. De igual manera la evaluación del desempeño de la red es distinta para cada uno de los artículos presentados, así como también considerar la capacidad de los puntos de acceso de adaptarse a los cambios dinámicos para tener un mejor rendimiento que beneficie a los usuarios finales.

2.3. Tabla comparativa de algoritmos en la literatura

La siguiente tabla, presenta los algoritmos que han sido desarrollados y que se han presentado en artículos académicos/investigación.

Nombre del artículo	Año de publicación	Nombre del algoritmo	Descripción	Tipo de operación	Parámetros considerados	Parámetros que modifica			Evaluación de rendimiento	
						Canal	Potencia de transmisión	Nivel de sensado de portadora	Simulado	Implementado
WLAN channel selection without communication [15]	2012	Communication-free learning algorithm (CFL)	Evalúa Frame error rate(RTS/CTS) como medida de calidad de la señal para elegir el mejor canal.	Distribuido	Tasa de error de RTS/CTS	✓	✗	✗	✓	✓
BEST-AP: Non-intrusive estimation of available bandwidth and its application for dynamic access point selection [16]	2013	BEST-AP	Depende de la calidad de señal y de la carga de usuarios que tenga un AP, Hace mediciones de ancho de banda de los AP vecinos y calcula la carga de usuarios conectados.	Distribuido	Ancho de banda de cada AP y tasa de error de RTS/CTS	✓	✗	✗	✓	✓
On the Goodness of Using Orthogonal Channels in WLAN IEEE 802.11 in Realistic Scenarios [14]	2018	SA (Simulated Annealing)	Crea un grafo a partir de la topología y asigna pesos a las aristas para cambiar de canal.	Centralizado	Potencia de transmisión, ganancias de pérdidas de transmisión y recepción, sensibilidad, altura de transmisor y receptor, SIR, parámetro PSI (ψ)	✓	✗	✗	✓	✓
A Dynamic and Autonomous Channel Selection Strategy for Interference Avoidance in 802.11 [17]	2018	Hopping-BSS	Hace saltos de canal para los AP y registra la interferencia disruptiva para determinar con el BSS el mejor canal.	Distribuido	Paquetes enviados con y sin errores, tiempo de slot	✓	✗	✗	✓	✓
Distributed Channel Management in Uncoordinated Wireless Environments [11]	2006	MAXchop	El algoritmo hace que el AP pase cierto tiempo en cada canal y va cambiando.	Distribuido	Tiempo de slots y valores de interferencia que recibe de AP vecinos	✓	✗	✗	✓	✓
Evaluation of Dynamic Sensitivity Control Algorithm for IEEE 802.11ax [19]	2015	Dynamic Sensitivity Control (DSC)	Algoritmo que ajusta dinámicamente el umbral de detección de portadora.	Distribuido	RSSI, bytes totales recibidos por los receptores por segundo, tasa de error de trama	✗	✗	✓	✓	✗
Socially Conscious Channel Selection in 802.11 WLANs for Coexistence in a Non-cooperative Environment [10]	2009	Channel Selection using BR Learning (CSBRL)	Evalúa la utilidad del canal, luego evalúa la interferencia de AP que están en su mismo canal, después calcula la equidad de toda la red y cambia de canales hasta encontrar la mejor equidad de toda la red.	Distribuido	<i>throughput</i> máximo y mínimo de cada red, <i>throughput</i> máximo y mínimo de la red total	✓	✗	✗	✓	✗
CACAO: Distributed Client-Assisted Channel Assignment Optimization for Uncoordinated WLANs [18]	2011	Client-Assisted Channel Assignment Optimization (CACAO)	Evalúa los canales con información de los clientes y de otros AP, toma en cuenta el canal que menos interferencia le produce y luego cambia a ese canal.	Distribuido	Interferencia total de otros AP y BSS	✓	✗	✗	✓	✗

Cuadro 2.2: Tabla comparativa de algoritmos en la literatura

Capítulo 3

Algoritmo de selección de canal

El presente algoritmo tiene el objetivo de asignar nuevos canales de operación a los dispositivos AP que se encuentran en una topología, con la finalidad de reducir la interferencia entre AP vecinos. Este algoritmo tiene por característica principal considerar únicamente la distancia entre los AP vecinos.

El cambio de canal busca minimizar el impacto que tiene la interferencia cocanal, el origen de esta interferencia surge del uso de un mismo canal para todos los puntos de acceso. Para medir el impacto que este cambio genera en el desempeño individual y general de la red, es necesario cuantificar el rendimiento obtenido. Es por lo que el uso de distintas métricas permite obtener un resultado en términos de rendimiento y aprovechamiento del recurso espectral.

3.1. Métricas de equidad (*Fairness*)

En las redes inalámbricas, muchos puntos de acceso compiten por los recursos disponibles, creando así un desafío en la asignación de recursos, tomando en cuenta esto, se tienen dos términos que son importantes al momento de evaluar los experimentos realizados. El primero es rendimiento, este término se refiere a la utilización de la red inalámbrica y el segundo es equidad, se refiere a un equilibrio en el reparto de recursos.

Jain's index

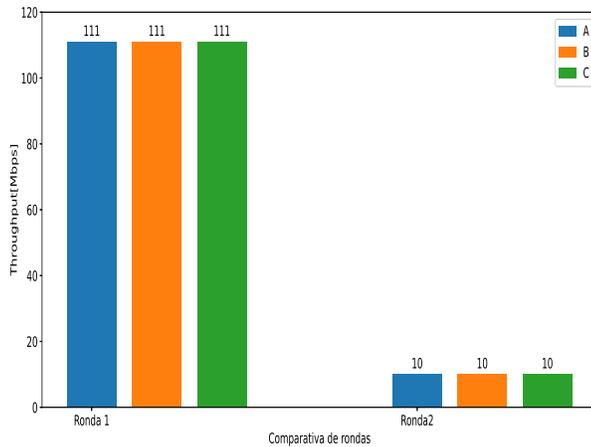
Rajendra K. Jain [23] propuso un parámetro que permite medir el reparto equitativo de los recursos de la red, usando la siguiente ecuación:

$$\text{Jain's index} = \frac{(\sum X_i)^2}{n \cdot \sum X_i^2} \quad (3.1)$$

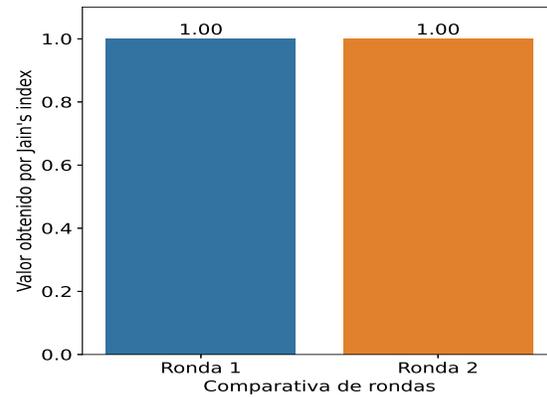
En donde X_i representa el *throughput* normalizado obtenido por cada nodo. El índice de equidad (jain index), es un valor entre 0 y 1, donde 1 muestra la distribución más equitativa del ancho de banda disponible del enlace entre los flujos de la competencia de una red. Mientras que 0 muestra una distribución injusta de los recursos disponibles del enlace. Esta métrica es la más ampliamente utilizada en la literatura especializada en redes inalámbricas.

Un ejemplo del uso de esta métrica se presenta en las figuras 3.1a y 3.1b. Para tres nodos A, B y C en una primera ronda de experimentos los tres alcanzaron el máximo *throughput* posible, que es de 111 Mbps. En una segunda ronda de experimentos, alcanzaron 10 Mbps.

Para la métrica jain's index estos valores de *throughput* obtenido indicarían el valor en la primera ronda de 1, de igual manera, el valor de esta métrica para la segunda ronda es de 1 también.



(a) *throughput* obtenido por los AP



(b) Valores obtenidos por la métrica

Figura 3.1: Gráficas de rendimiento de Jain's index

Esto es una característica inconveniente de esta métrica, porque solamente indica qué tan justo fue el reparto de los recursos para la red, sin importar si alcanzaron el máximo o no. En este ejemplo, ambos valores fueron de 1, indicando que ambos experimentos fueron justos. Esto también hace necesario considerar una segunda métrica que considere el *throughput* obtenido para evaluar el rendimiento.

Distancia normalizada

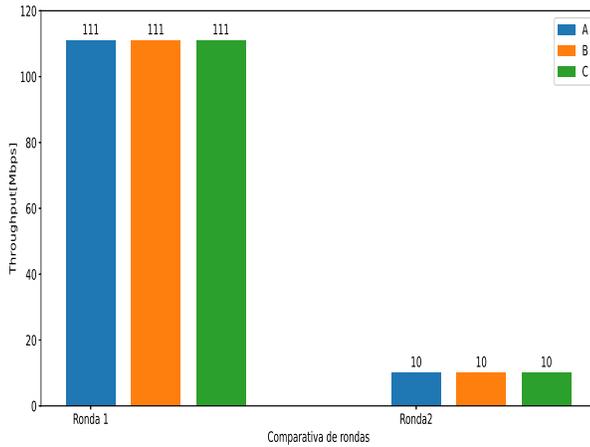
Un segundo índice de equidad considerado para estas pruebas es el de distancia normalizada. Este parámetro que considera la “distancia” propiamente dicha, desde el valor obtenido hasta un valor considerado óptimo.

$$\text{Distancia normalizada} = \frac{[\sum (T_i - O_i)^2]^{\frac{1}{2}}}{[\sum O_i^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.2)$$

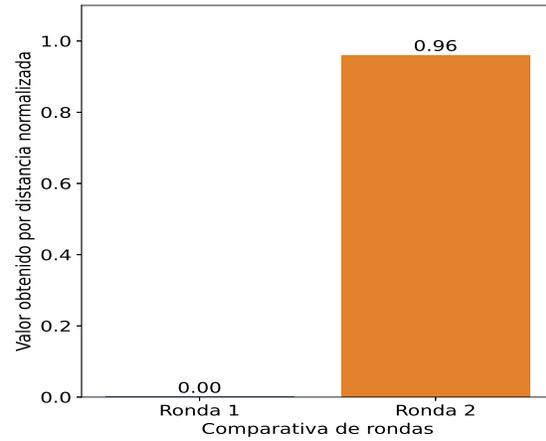
En donde T_i representa el *throughput* obtenido por cada elemento de la red y O_i representa el óptimo que debe alcanzar cada elemento de la red.

Un ejemplo del uso de esta métrica se presenta en las figuras 3.2a y 3.2b. Para tres nodos A, B y C en una primera ronda de experimentos los tres alcanzaron el máximo *throughput* posible, que es de 111 Mbps. En una segunda ronda de experimentos, alcanzaron 10 Mbps.

Para la métrica distancia normalizada, el valor obtenido para la primera ronda de experimentos, el valor es de 0, indicando que el máximo *throughput* fue alcanzado. Por otro lado, para la segunda ronda de experimentos, el valor obtenido por la métrica es de 0.96, indicando que el *throughput* alcanzado está muy por debajo del máximo a alcanzar.



(a) *throughput* obtenido por los AP



(b) Valores obtenidos por la métrica

Figura 3.2: Gráficas de rendimiento de distancia normalizada

De esta manera se puede decir que la métrica de distancia normalizada resulta opuesta a la métrica de jain's index.

Métrica compuesta

Como parte del desarrollo de los experimentos que se presentan a lo largo de esta tesis, se propone una nueva métrica:

$$\text{Métrica compuesta} = 1 - \text{Jain's index} + \text{Dist. normalizada} \quad (3.3)$$

Esta métrica compuesta tiene el objetivo de evaluar que la distribución de los recursos como el ancho de banda sea justa y que todos los elementos de la red obtengan el máximo *throughput*.

En esta métrica compuesta, la métrica de equidad y métrica de tasa de transmisión tienen la misma importancia. Cabe resaltar que para la métrica de distancia normalizada se considera como el valor óptimo la velocidad máxima teórica del estándar (por ejemplo, el estándar IEEE 802.11G tiene una velocidad máxima teórica de 54 Mbps).

Ejemplo general

Se presenta un ejemplo de cómo el uso de estas métricas proporciona una perspectiva más amplia para evaluar el rendimiento de una red. El siguiente caso de tres AP (A, B, C) donde obtuvieron los siguientes *throughput*: A=111 Mbps, B=80 Mbps, C=55 Mbps; cuando el óptimo que deberían obtener es el siguiente: A=111 Mbps, B=111 Mbps, C=111 Mbps.

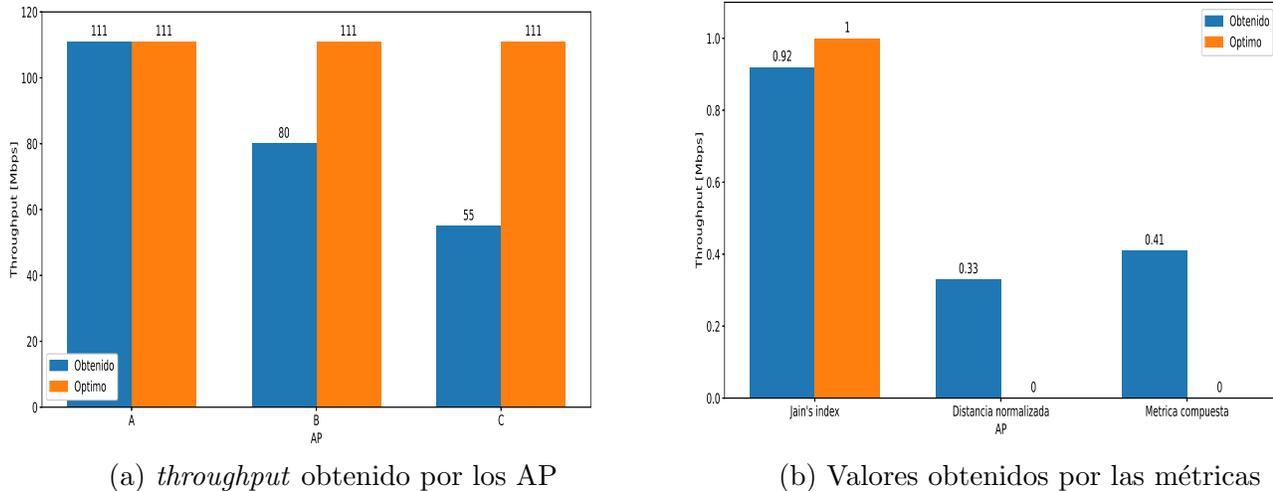


Figura 3.3: Gráficas de rendimiento de métricas

En la figura 3.3a se presenta el *throughput* obtenido por estos nodos, la figura 3.3b presenta los valores obtenidos por las 3 métricas anterior mencionadas.

El proponer una métrica compuesta de las dos primeras, nos permite obtener un resultado más completo. Primeramente, el índice de Jain únicamente proporciona un valor que muestra qué tan justo fue el reparto de los recursos, qué es en este caso el reparto de *throughput* obtenido. Por otro lado, la distancia normalizada proporciona un valor que muestra qué tan ideal es el *throughput* obtenido en comparación con el óptimo que debe alcanzar cada nodo. Es así que la métrica compuesta muestra un valor mínimo (mientras más cercano a 0 es más cercano al óptimo, mientras más se aleja de 0 esta más alejado del óptimo) cuando ambas condiciones se cumplen, esto es que el reparto sea justo y que el *throughput* sea el óptimo.

3.2. Algoritmo de selección de canal

La principal característica de este algoritmo es considerar la distancia física existente entre los distintos puntos de acceso que están dispuestos sobre un área determinada. Para cada AP, la distancia a considerar es entre su primer y segundo vecino más cercano, donde la distancia entre su primer vecino es considerada como d_1 y la distancia entre su segundo vecino d_2 . La figura 3.4 muestra lo anterior.

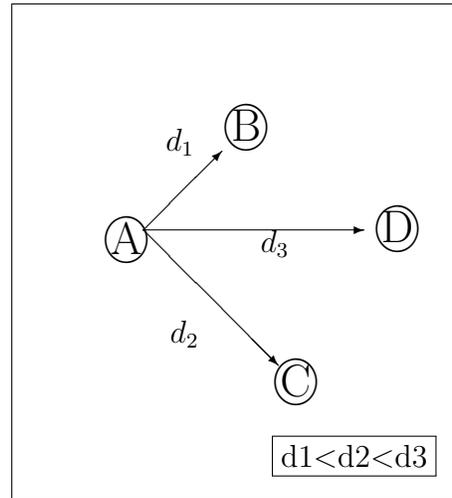


Figura 3.4: Distancias entre vecinos

De acuerdo con el modelo de propagación 2.2, la potencia recibida, disminuye conforme la distancia aumenta. Esto significa que la interferencia recibida proviene de los AP que están más próximos a él.

Considerar la distancia como métrica/parámetro para tratar este problema reduce de manera significativa el espacio de búsqueda, a razón de lo antes mencionado en la definición del problema. El número de combinaciones que involucra el número de canales ortogonales (3) y el número de AP (n) es de manera exponencial. Este enfoque del algoritmo permite reducir el número de experimentos a realizar así como mantener un nivel de complejidad bajo.

Debido a que el espacio de búsqueda original es demasiado grande, el algoritmo aquí propuesto intenta encontrar una solución aproximada a este problema sin explorar todo el conjunto del espacio de búsqueda. El considerar solo las dos distancias denominadas d_1 y d_2 permite aprovechar los tres canales ortogonales (1,6,11 en la banda de 2.4 GHz del estándar 802.11). De esta manera cada uno de los tres AP estaría operando en un canal diferente a sus dos vecinos más cercanos.

Una posible extensión de este algoritmo es el poder considerar una d_3 . Esto sería recomendable de contar con más canales ortogonales disponibles, ya que con ello se incrementaría el número de distancias a considerar para hacer uso de estos.

Selección de canal

La selección de canal del algoritmo hace uso de los tres canales ortogonales (1, 6 y 11) disponibles. Se describe aquí el proceso, desde el punto de vista de un nodo n_i :

Dado un conjunto de nodos definido como $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$, donde cada nodo $n_i \in N$ identifica sus vecinos más cercanos durante la etapa uno, la cual se muestra a continuación.

Etapa 1:

- Paso 1: Calcular el conjunto $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$, que contiene las distancias entre cada uno de los elementos, donde $\text{dist}()$ representa la distancia euclidiana.
- Paso 2: El conjunto D_i debe ser ordenado: $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$.
- Paso 3: Ahora el nodo n_i puede estimar el subconjunto $N_i \subset N$, definido por $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_2\}$.

Una vez que todos los nodos han identificado a sus dos vecinos más cercanos, cada nodo $n_i \in N$ puede ahora escoger su canal con base en la configuración de sus vecinos más cercanos en la etapa dos, como se muestra a continuación.

Etapa 2:

- Paso 4: Se determina la lista de canales ocupados por los vecinos en el conjunto: $C_i = \{ch(n_k) \mid n_k \in N_i; ch(n_k) \in \{1, 6, 11\}\}$, cada $ch(n_k)$ denota el canal ocupado por el nodo n_k .
- Paso 5: El nodo n_i ahora puede estimar el conjunto de canales disponibles $C = \{1, 6, 11\} - C_i$.
- Paso 6: Si $ch(n_i) \notin C$, significa que n_i tiene el mismo canal que uno de sus vecinos; entonces n_i debe cambiar su canal a uno de C , si $|C| > 1$ entonces puede seleccionar aleatoriamente cualquier elemento en C .

Es importante notar que los nodos repiten la etapa dos hasta que algoritmo converge, lo que significa que ningún nodo cambia de canal.

La implementación de este algoritmo fue realizada mediante Python. Dada una topología, cada AP ejecuta la etapa uno de algoritmo como se mostró previamente. Posteriormente, los AP ejecutan la etapa dos de manera asíncrona, mediante una estrategia en la que cada AP escoge un intervalo de tiempo aleatorio antes de ejecutar el procedimiento de la etapa dos. Los AP repiten el proceso de escoger un retardo aleatorio y ejecución de la etapa dos hasta que ya no se realizan cambios de canal (estado estable). De esta forma, se evita que dos AP ejecuten el algoritmo de selección de canal al mismo tiempo, evitando de esta forma conflictos o interferencias al momento de cambiar de canal.

Ejemplo de operación del algoritmo de cambio de canal

Esta sección presenta un ejemplo del funcionamiento del algoritmo de cambio de canal aplicado sobre un escenario compuesto de cuatro nodos.

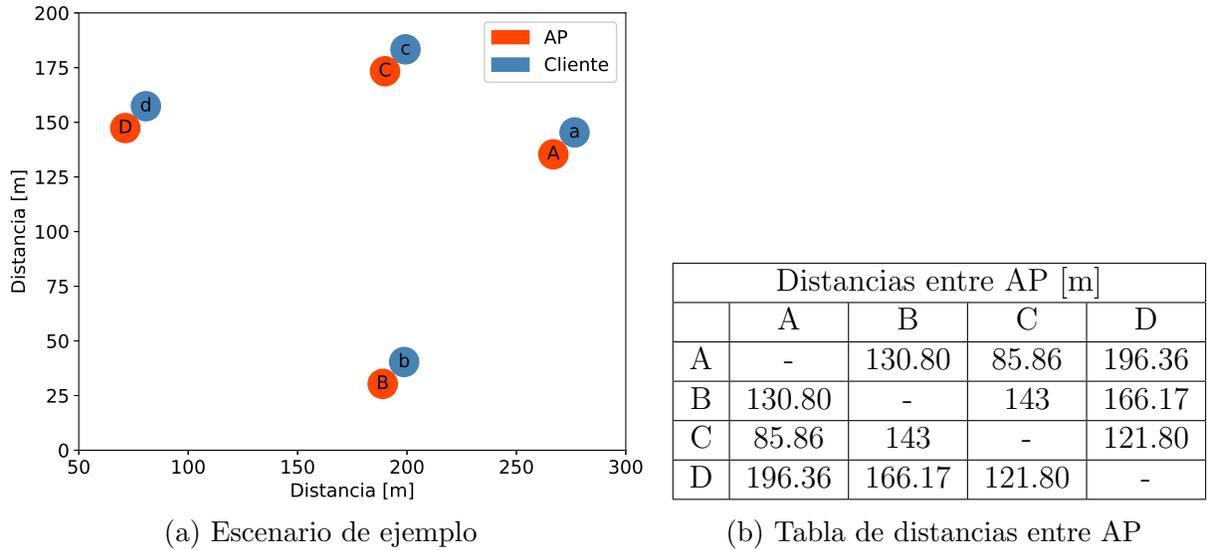


Figura 3.5: Topología y tabla de vecinos

Asumiendo que el AP A sería el primer AP sobre el cual se ejecuta el algoritmo, éste comenzaría por calcular las distancias entre él y sus AP vecinos. Esta tarea podría realizarse, por ejemplo, en casos donde los AP estén en espacios exteriores y se conozcan sus respectivas coordenadas. Otra forma en la que un AP puede estimar que AP son los más cercanos es usando la potencia de recepción con cada uno de sus vecinos.

Los AP son configurados previamente en modo monitor. De esta manera realizan un escaneo en los distintos canales de operación, al escuchar a sus vecinos, estiman la distancia entre cada uno de ellos.

La tabla 3.5b muestra las distancias entre todos los AP de la topología. La distancia entre A y C es de 85.86 m, mientras que la distancia entre A y B es de 130.80 m. Estos AP son los dos más cercanos al AP A.

Inicialización: Cada AP se inicializa con el canal cero como se muestra en la figura 3.6a. Posteriormente “A” identifica el canal de operación de sus dos vecinos más cercanos.

Iteración 1 (Turno de A): A elige un canal diferente al de sus dos vecinos más cercanos, en este caso A cambiará ya sea el canal uno o dos. En este caso A elige cambiar al canal uno, ver figura 3.6b.

Iteración 2 (Turno de C): C identifica los canales de sus dos vecinos más cercanos. C elige un canal diferente al de ellos, y en este caso elige el canal dos, ver figura 3.6c.

Iteración 3 (Turno de D): D averigua el canal de sus dos vecinos más cercanos y cambia su canal al canal 1. Si bien ya existe un AP en ese canal (A), debido a que D únicamente considera a sus dos vecinos más cercanos, el canal de A no es considerado en la decisión de D, ver figura 3.6d.

Iteración 4 (Turno de B): Finalmente es el turno de B, cuyos vecinos más cercanos son A y C, eligiendo el mismo canal de operación que tenía en la iteración anterior (canal cero), ver figura 3.6d.

De este modo el algoritmo termina de asignar (converge) diferentes canales de operación a cada uno de los AP existentes.

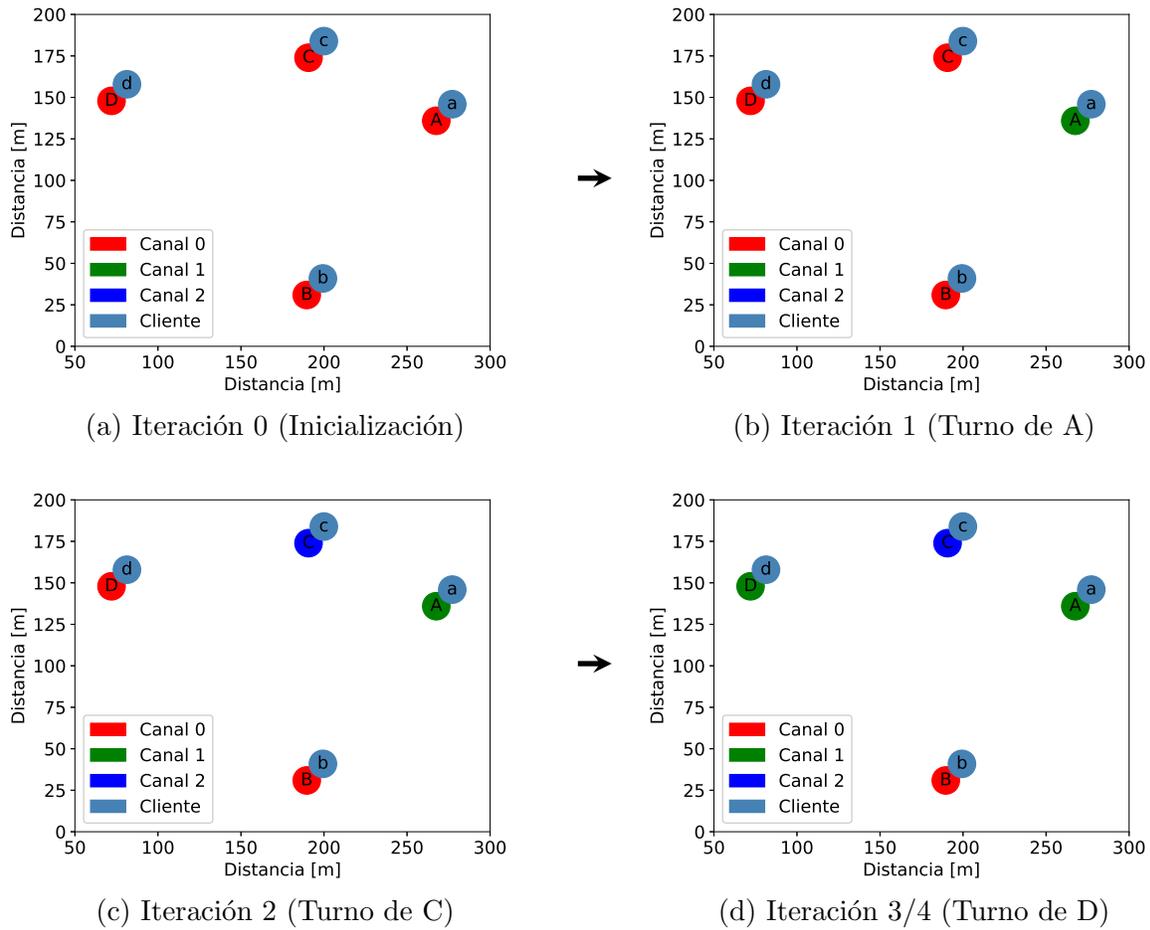


Figura 3.6: Iteraciones del cambio de canal

Pseudocódigo del algoritmo de selección de canal

Como mencionamos previamente, el algoritmo de selección de canal es completamente distribuido, por lo que cada AP tendría que ejecutar un algoritmo que tome la decisión del canal a utilizar completamente independiente de la operación de los otros AP. En esta sección se muestra el pseudocódigo correspondiente al algoritmo que ejecutará cada AP.

Algoritmo 1 Algoritmo de selección de canal

Entrada: $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$

- 1: Inicialización del algoritmo
 - 2: Etapa 1:
 - 3: Calcular $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$; dist=(distancia euclidiana)
 - 4: Ordenar D_i : $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$
 - 5: Calcular $N_i \subset N$; $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_2\}$.
 - 6: **while** True **do**
 - 7: $t_i \leftarrow \text{Uniform}(0, t_{max})$
 - 8: *sleep*(t_i)
 - 9: Etapa 2:
 - 10: Determinar canales ocupados por los vecinos $C_i = \{ch(n_k) \mid n_k \in N_i; ch(n_k) \in \{1, 6, 11\}\}$
 - 11: Revisar canal de operación $C = \{1, 6, 11\} - C_i$.
 - 12: **if** $ch(n_i) \notin C$ **then**
 - 13: **if** $|C| > 1$ **then**
 - 14: Escoger aleatoriamente un canal de C .
 - 15: **else**
 - 16: Asignar el único canal disponible en C
 - 17: **end if**
 - 18: **end if**
 - 19: **end while**
-

Capítulo 4

Algoritmos de selección de potencia y umbral de sensado

Como se muestra en la Sección 2, en muchos casos los puntos de acceso están en una configuración por defecto establecida por el fabricante. Dicha configuración es generalmente potencia máxima y nivel de umbral de sensado de portadora mínimo. Esto supone un problema, ya que al solo estar enfocados en únicamente separar en frecuencia de operación a cada uno de ellos, esas configuraciones predefinidas tienen un impacto en el desempeño individual y global de la red.

El control de la potencia de transmisión reduce de manera importante el nivel de interferencia generado en los puntos de acceso cercanos. Evita un problema de rendimiento que surge cuando los clientes operan a diferentes velocidades de transmisión de datos. El reducir la potencia de transmisión entre transmisor y un receptor cuando están muy cerca uno del otro representa una disminución de la interferencia hacia los puntos de acceso vecinos que usan la misma frecuencia o canal. Por otro lado, como parte de mejorar la reutilización espacial, el ajuste de umbral de sensado de portadora es un desafío. Incrementado este umbral se reduce el número de AP que compiten entre sí, mejorando la oportunidad de transmisión de cada uno. En ambos casos, tanto del control de potencia de transmisión como el ajuste del umbral de sensado, el objetivo es mitigar el impacto que la interferencia inflige sobre el rendimiento de la red, así como homogeneizar el comportamiento que cada AP tiene con respecto de los demás.

El ajuste de parámetros de potencia de transmisión y umbral de sensado constituyen una intervención en los puntos de acceso más detallado/delicado, pues significaría mejorar o empeorar el rendimiento obtenido por este. En este trabajo, el desarrollo de un segundo algoritmo tiene la premisa de utilizar la distancia como principal parámetro para la selección de estos parámetros.

Se establecieron las configuraciones que cada AP puede tener en términos de potencia de transmisión y umbral de sensado, resultando de la siguiente manera:

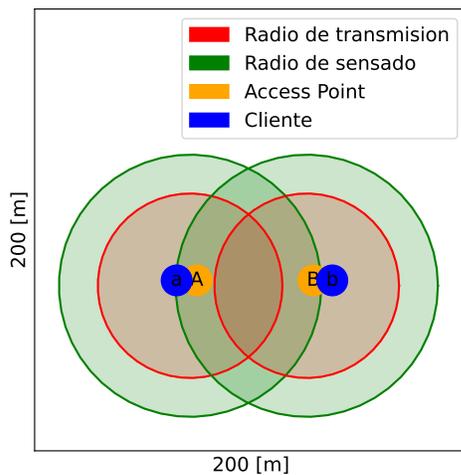
- Configuración 1: Potencia de transmisión= 20 dBm, Sensado= -90 dBm
- Configuración 2: Potencia de transmisión= 20 dBm, Sensado= -68 dBm
- Configuración 3: Potencia de transmisión= 5 dBm, Sensado= -90 dBm
- Configuración 4: Potencia de transmisión= 5 dBm, Sensado= -68 dBm

La elección de dos potencias de transmisión que pueden considerarse como alta y baja permite manejar la asignación de potencia de transmisión de mejor manera. Generalmente, los dispositivos AP comerciales disponen únicamente de un intervalo limitado dentro del cual pueden ajustar la potencia de transmisión. Los valores típicos de estas potencias son 10 dBm y 20 dBm [24].

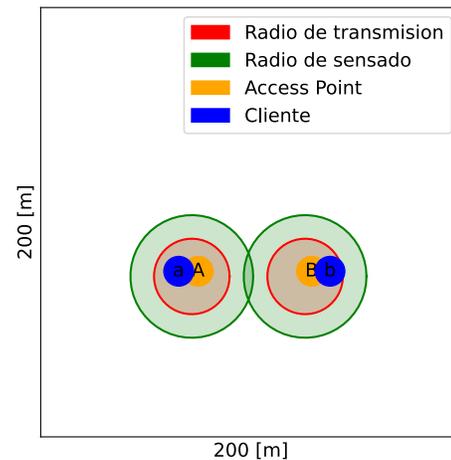
El considerar valores específicos de potencia de transmisión hace que los radios tengan fluctuaciones en la potencia transmitida, volviéndolos inestables y afectando el rendimiento. De igual manera, el considerar más de una potencia de transmisión y umbral de sentido incrementa geoméricamente el espacio de búsqueda del algoritmo.

Con estas configuraciones establecidas es posible iniciar la concepción de este segundo algoritmo. El siguiente ejemplo muestra cómo el modificar estos parámetros crea una situación favorable para los AP en una topología. En este ejemplo se consideran dos AP (A y B) y un cliente asociado a cada uno. En la figura 4.1a se muestra que la potencia de transmisión (círculo rojo) de ambos AP es alta y el umbral de sentido (círculo verde) es bajo. En la figura 4.1b, por otro lado, se muestra que ambos AP cambian a una potencia de transmisión baja, lo cual disminuye el radio de sentido en consecuencia. Es importante recordar que el radio de sentido de un AP depende de su umbral de sentido y de la potencia de transmisión del otro AP considerado. El impacto de reducir la potencia de transmisión se puede ver reflejado en las figuras 4.1c y 4.1d. En el caso de la figura 4.1c solo transmite un AP a la vez, mientras que en la figura 4.1d pueden transmitir los dos AP de manera simultánea.

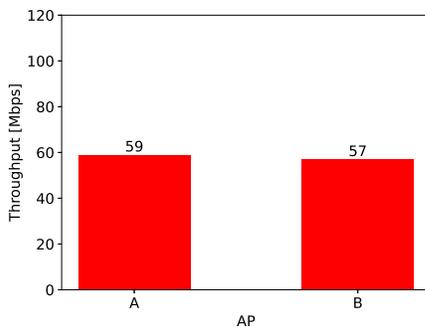
Potencia de transmisión



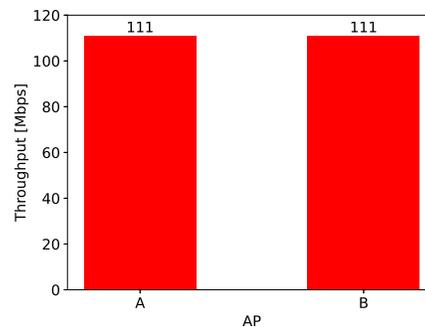
(a) AP con potencia alta



(b) AP con potencia baja



(c) *throughput* obtenido con potencia alta

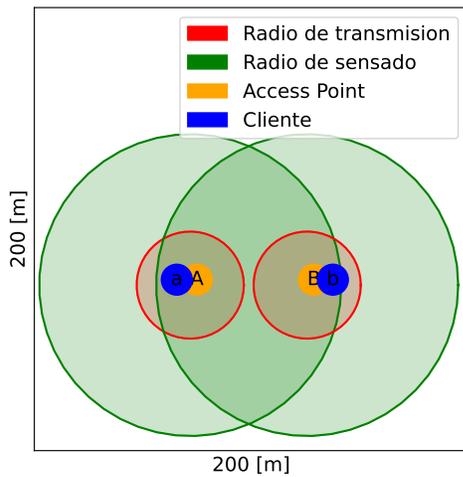


(d) *throughput* obtenido con potencia baja

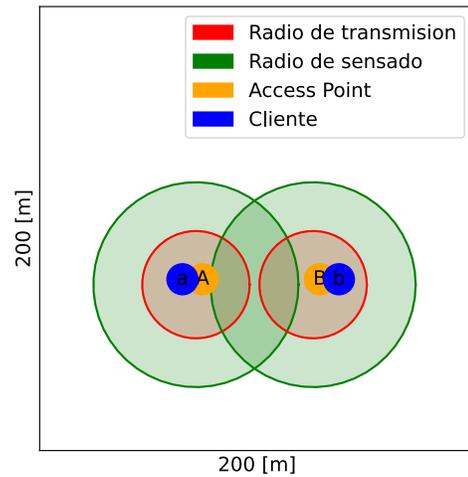
Figura 4.1: Comparativa de *throughput* debido al cambio de los parámetros potencia de transmisión y umbral de sentido.

En la figura 4.2b se muestra que el rango de transmisión (círculo rojo) de ambos AP es alto y el umbral de sensado es bajo (círculo verde). Esta configuración no permite que los dos AP transmitan de manera simultánea (ver figura 4.2d). Sin embargo, en la figura 4.2a ambos AP cambian a un umbral de sensado alto (círculo verde), lo cual evita que un AP detecte la presencia del otro, permitiendo transmisiones simultáneas (ver figura 4.2c).

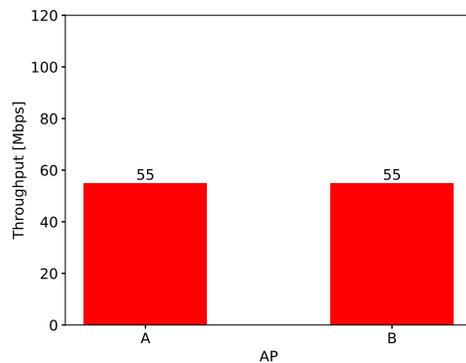
Umbral de sensado



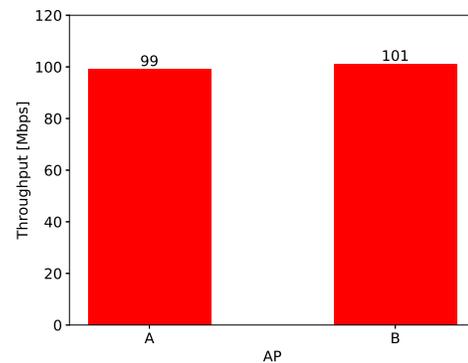
(a) AP con umbral de sensado bajo



(b) AP con umbral de sensado alto



(c) *throughput* obtenido con umbral de sensado bajo



(d) *throughput* obtenido con umbral de sensado alto

Figura 4.2: Comparativa de *throughput* debido al cambio de los parámetros potencia de transmisión y umbral de sensado.

4.1. Problema de espacio de búsqueda

El algoritmo de selección de canal es el primer paso en la optimización y el reúso espacial para puntos de acceso. Anteriormente se hizo referencia al espacio de búsqueda que involucra únicamente los tres canales denominados ortogonales. Para esta nueva sección, el espacio de búsqueda se incrementa de manera geométrica, ahora considerando cuatro configuraciones generales que involucran potencia de transmisión y umbral de sensado de portadora. Inicialmente, al considerar cualquier topología, se presenta una situación problemática de espacio de búsqueda. Esta se refiere a cuando en una topología existe un determinado número de AP, las configuraciones que cada uno de ellos puede tener son las cuatro posibilidades anteriormente mencionadas. Cuando el número de AP se incrementa, el número de combinaciones en la red en su conjunto también lo hace. Para expresar mejor esta situación, la tabla 4.1 muestra el crecimiento geométrico del número de combinaciones existentes para algunas cantidades de AP.

Número de AP	Número de combinaciones
1	4
2	16
3	64
4	256
5	1024
6	4096
7	16,384
8	65,536
9	262,144
10	1,048,576

Cuadro 4.1: Tabla del número de combinaciones

Como se puede observar en la tabla 4.1, para cuando se consideran 10 AP, el número de combinaciones diferentes es muy grande. El hecho de que el algoritmo propuesto considera solo a los dos vecinos más cercanos reduce el espacio de búsqueda en comparación de una búsqueda global. En esta sección se presentan tres algoritmos, los cuales tienen por objetivo optimizar el rendimiento de cada AP. Estos tres algoritmos tienen la premisa de únicamente explorar las combinaciones con sus AP vecinos más cercanos. En este sentido, cada AP tendría primero que calcular su distancia con los AP en su vecindario y estimar el *throughput* con respecto a sus vecinos más cercanos para elegir su configuración.

Para estimar el *throughput* de cada una de las combinaciones entre un AP y sus vecinos más cercanos es necesario que el resto de los AP en el vecindario temporalmente no transmitan. De lo contrario, habría interferencia/ruido externo que afectaría los valores obtenidos de cada combinación resultando en la elección de configuraciones erróneas por los AP.

Finalmente, los algoritmos propuestos apuestan fuertemente por la hipótesis de este trabajo que plantea que la optimización en un espacio de búsqueda que solo incluye a los AP más cercanos logra un resultado cercano al que obtendría un algoritmo de fuerza bruta sobre el espacio de búsqueda global.

4.2. Algoritmo de una pareja

Este algoritmo es el primero de esta serie, tiene la característica de únicamente considerar al primer vecino más cercano de cada uno de los AP. La razón de considerar a su primer vecino más cercano radica en el hecho de que la interferencia cocanal, al igual que la potencia recibida, varía con la distancia. En este sentido, el vecino más cercano es el que aporta la mayor interferencia de entre todos los vecinos de un AP.

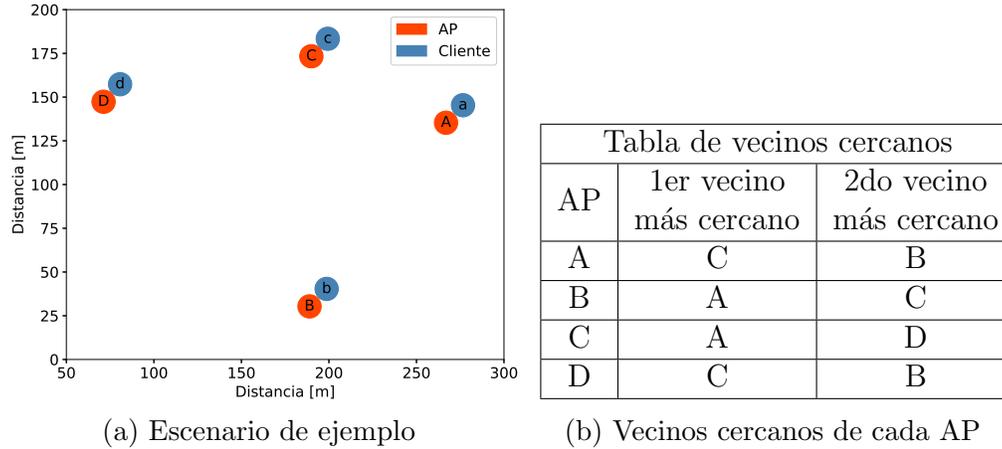


Figura 4.3: Topología y tabla de vecinos

Metodología para el cambio de configuración

De nueva cuenta asumamos un conjunto de nodos definido como $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$, donde cada nodo $n_i \in N$ identifica sus vecinos más cercanos.

Etapa 1:

- Paso 1: Calcular el conjunto $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$, donde $\text{dist}()$ representa la distancia euclidiana.
- Paso 2: El conjunto D_i debe ser ordenado: $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$.
- Paso 3: Ahora el nodo n_i puede estimar el subconjunto $N_i \subset N$, definido por $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_1\}$.

Cabe resaltar que, el caso del algoritmo de una pareja, la definición del conjunto N_i únicamente contiene a su primer vecino más cercano.

Etapa 2:

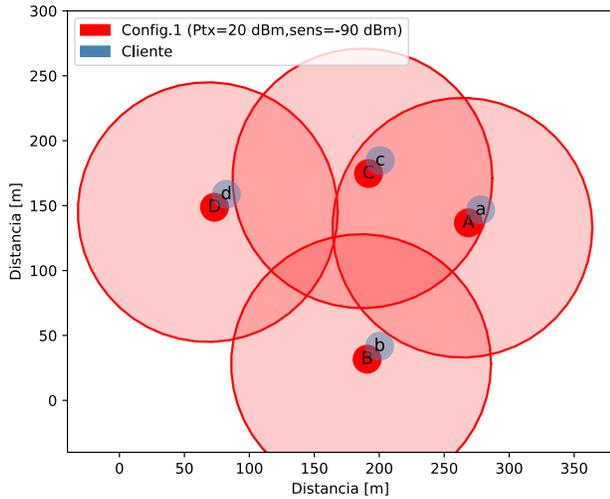
- Paso 4: Con base en la posición del nodo $p \in N_i$, el nodo n_i simula los 16 escenarios posibles entre estos dos nodos. Con base en estos resultados, n_i obtiene el conjunto $M = \{m_{j,k} \mid j, k \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(p)\}$. El valor de $m_{j,k}$ estará definido por la métrica compuesta (previamente descrita) del resultado de la simulación cuando el nodo n_i utiliza la configuración j , y el nodo p utiliza la configuración k .
- Paso 5: Los resultados de las simulaciones son ordenados con base en la métrica dada, $\hat{M} = \{m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_{16}\}$.
- Paso 6: El nodo n_i escoge la configuración con la mejor métrica compuesta del conjunto \hat{M} , si hay un empate escogerá una de forma aleatoria.

Ejemplo de operación del algoritmo:

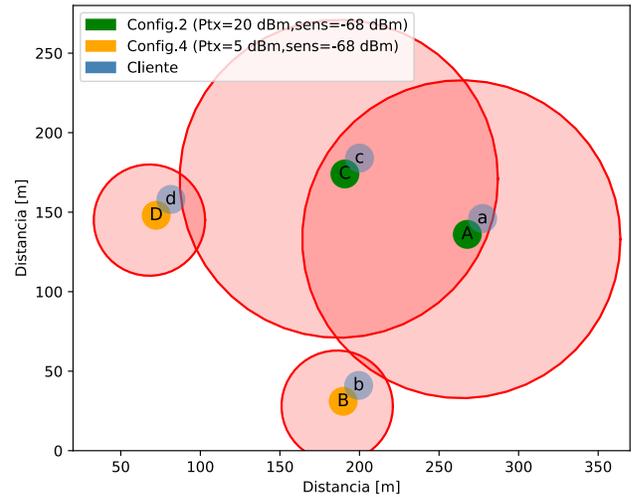
Para este ejemplo de operación utilizaremos la topología descrita en la figura 4.3a.

Inicialización: Asumiendo que el AP A fuese el primer AP que ejecuta el algoritmo, su vecino más cercano es C, formando la pareja (A-C).

Ejecución del algoritmo: A y C experimentan las 16 combinaciones posibles entre ellos y registran el valor de la métrica para cada permutación. Finalmente, el nodo A elige como su nueva configuración aquella que proporcione el valor más bajo, en términos de métrica, de las 16 combinaciones. En caso de empate en la métrica, el nodo elegirá de forma aleatoria alguna de las configuraciones que empataron con la métrica más baja. En la figura 4.4 se muestra un ejemplo de operación con cuatro AP. En este caso, en la figura 4.4a se muestra la configuración inicial que en este caso es con la configuración 1. En contraste, en la figura 4.4b se muestran las configuraciones asignadas después de ejecutar el algoritmo de una pareja. En la figura 4.4c se muestran los resultados en términos de *throughput* antes y después de la ejecución del algoritmo de una pareja, respectivamente. Los círculos representan el radio de transmisión de acuerdo con cada configuración asignada.



(a) AP en configuración inicial



(b) AP con nuevas configuraciones asignadas

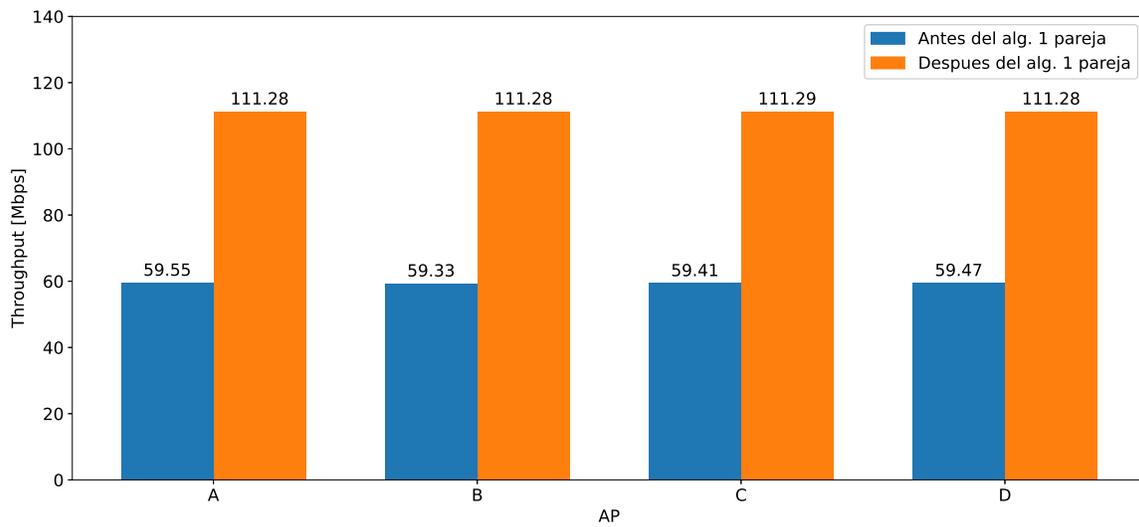
(c) Comparativa en *throughput*

Figura 4.4: Ejemplo de operación del algoritmo de una pareja.

Pseudocódigo del algoritmo de una pareja

En esta sección se muestra el pseudocódigo del algoritmo de una pareja. Dado que el algoritmo funciona de forma distribuida, cada AP deberá ejecutar el mismo código para obtener su configuración (i.e., potencia de transmisión y umbral de sentido) que mejora su desempeño.

Algoritmo 2 Algoritmo de una pareja

Entrada: $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$

- 1: Inicialización del algoritmo
 - 2: Etapa 1
 - 3: Calcular $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$; dist=(distancia euclidiana)
 - 4: ordenar D_i : $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$
 - 5: $N_i \subset N$; $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_1\}$.
 - 6: Etapa 2
 - 7: El nodo n_i considera al nodo $p \in N_i$
 - 8: El nodo n_i lleva a cabo las simulaciones y obtiene el conjunto $M = \{m_{j,k} \mid j, k \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(p)\}$.
 - 9: Se ordena el conjunto M , $\hat{M} = \{m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_{16}\}$.
 - 10: n_i asigna la configuración con la mejor métrica, si hay un empate escoge de forma aleatoria.
-

4.3. Algoritmo de dos parejas

Como previamente fue descrito, la interferencia proveniente de los nodos cercanos decae conforme aumenta la distancia que los separa. De esta manera, la mayor fuente de interferencia será siempre el AP vecino más cercano. A diferencia del algoritmo de una pareja, un algoritmo que considere no sólo al vecino más cercano, sino que contemple también al segundo vecino más cercano tendría, en consecuencia, un mejor desempeño ya que contempla las dos fuentes de mayor interferencia para un AP.

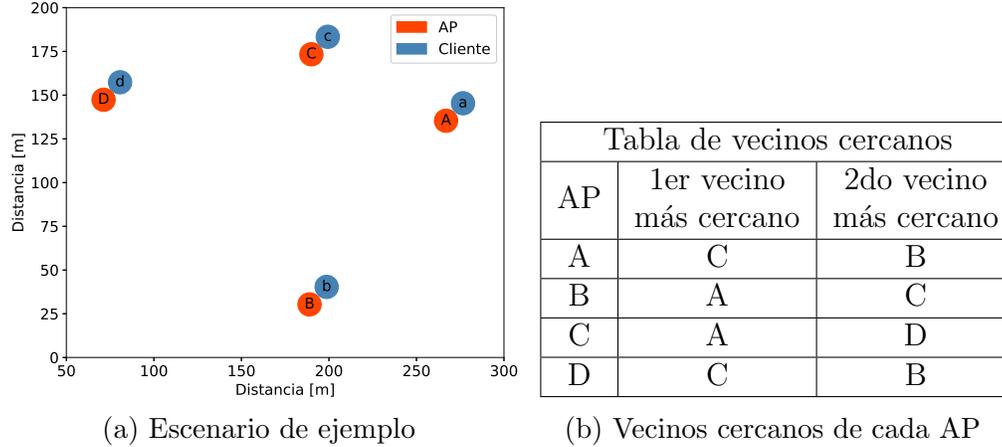


Figura 4.5: Topología y tabla de vecinos

Metodología para el cambio de configuración

Como los algoritmos previamente descritos, asumimos un conjunto definido como $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$, donde cada nodo $n_i \in N$ identifica a sus vecinos más cercanos.

Etapas 1:

- Paso 1: Calcular el conjunto $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$, donde $\text{dist}()$ representa la distancia euclidiana.
- Paso 2: El conjunto D_i debe ser ordenado: $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$.
- Paso 3: Ahora el nodo n_i puede estimar el subconjunto $N_i \subset N$, definido por $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_2\}$.

En este caso en particular, el conjunto N_i contendrá únicamente a los dos vecinos más cercanos a n_i , al igual que en el caso anterior, el nodo n_i deberá estimar el valor de métrica obtenido para las 16 configuraciones posibles con su segundo vecino más cercano, además de las 16 configuraciones con el vecino más cercano. Cabe resaltar que las estimaciones en cada vecino se llevan a cabo por separado.

Etapas 2:

- Paso 4: Para cada nodo $p \in N_i$, el nodo n_i simula los 16 escenarios posibles entre el nodo p y n_i . Con base en estos resultados, n_i obtiene el conjunto $M = \{m_{j,k} \mid j, k \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(p)\}$. En este caso habrán dos conjuntos: M_{d1} y M_{d2} .
- Paso 5: El nodo n_i escoge la configuración que logre la mejor métrica tanto en el conjunto \hat{M}_{d1} , como en el conjunto \hat{M}_{d2} .

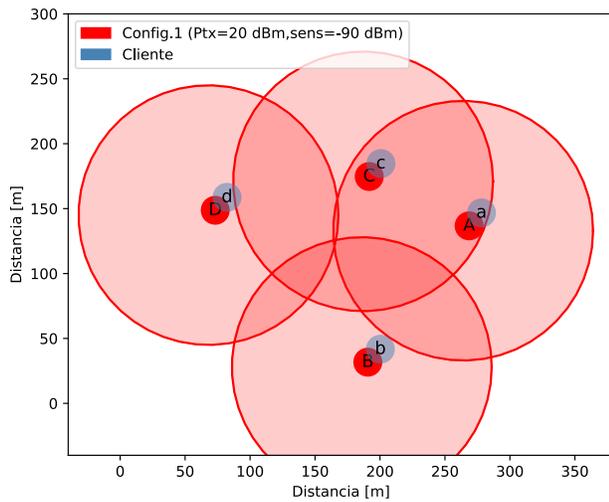
Ejemplo de operación del algoritmo

Para este ejemplo de operación utilizaremos la topología descrita en la figura 4.5a.

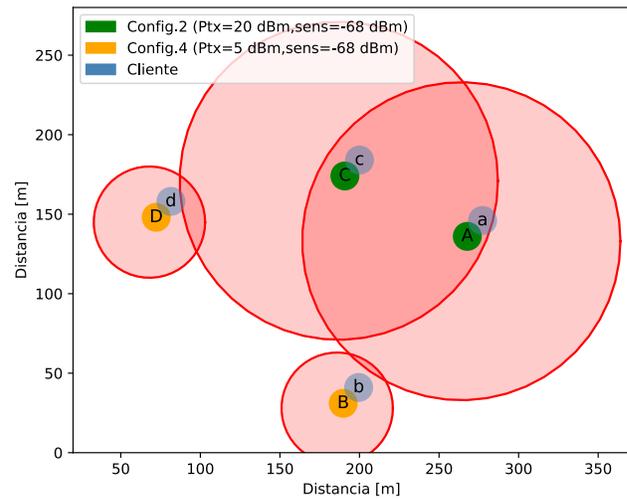
Inicialización: Una vez conocidos los vecinos más cercanos para cada AP, se seleccionan los dos vecinos más cercanos para formar parejas. Por ejemplo, desde el punto de vista de A, sus 2 vecinos más cercanos son, C y B, formando las parejas A-C y A-B (ver figura 4.5).

Ejecución del algoritmo: El nodo A realiza los 16 experimentos correspondientes para la primera pareja (A-C), y posteriormente los 16 experimentos con la segunda pareja (A-B). De acuerdo con la metodología previamente descrita, el nodo A obtiene y ordena los resultados de ambos grupos de simulaciones. Para escoger la configuración que utilizará el nodo A, debe escoger la configuración que logre la mejor métrica tanto en el conjunto (A-C) como en el conjunto (A-B). Para lograr este objetivo, en esta tesis se propone que por cada valor posible de configuración (1, 2, 3 o 4), el nodo A calcule el promedio de la métrica tanto en el conjunto (A-C) como en el (A-B). Posteriormente sumará estos promedios de tal manera que ahora se cuenta con un valor numérico asociado a cada una de las cuatro configuraciones. El nodo A, escogerá aquella configuración con el menor índice numérico.

El resultado de la aplicación de este algoritmo se ilustra en la figura 4.6. Como se puede observar en esta figura cada AP comienza en la configuración 1. Finalmente, la salida del algoritmo resulta en nuevas asignaciones para cada uno de los AP (ver figura 4.6b).



(a) AP en configuración inicial



(b) AP con nuevas configuraciones asignadas

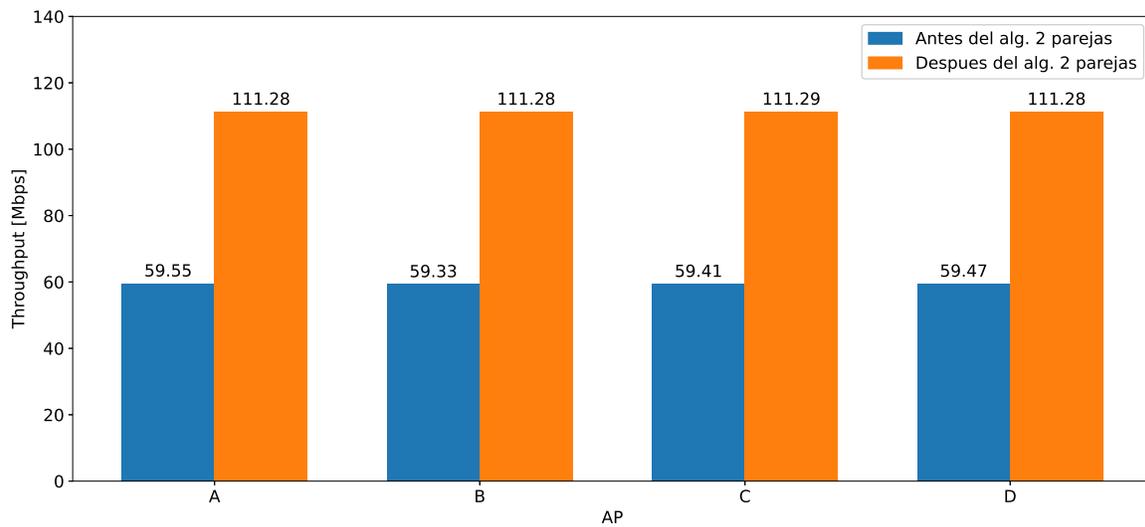
(c) Comparativa en *throughput*

Figura 4.6: Ejemplo de operación del algoritmo de dos parejas.

Pseudocódigo del algoritmo de dos parejas

En esta sección se muestra el pseudocódigo del algoritmo de dos parejas. Dado que el algoritmo funciona de forma distribuida, cada AP deberá ejecutar el mismo código para obtener la configuración que mejora su desempeño.

Algoritmo 3 Algoritmo de dos parejas

Entrada: $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$

- 1: Inicialización del algoritmo
 - 2: Etapa 1
 - 3: Calcular $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$; dist=(distancia euclidiana)
 - 4: ordenar D_i : $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$
 - 5: $N_i \subset N$; $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_1\}$.
 - 6: Etapa 2
 - 7: Seleccionar pareja (n_i, d_1) y (n_i, d_2) ; $d_1, d_2 \in N_i$.
 - 8: Obtener métricas de las simulaciones $M_{d1} = \{m_{j,k} \mid j, k \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(d1)\}$
 - 9: Obtener métricas de las simulaciones $M_{d2} = \{m_{j,k} \mid j, k \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(d2)\}$
 - 10: **for** $\text{conf} \in \{1, 2, 3, 4\}$ **do**
 - 11: $\text{index}_{d1}^{\text{conf}} = \frac{\sum\{m_{j,k} \mid j=\text{conf}, k \in \{1,2,3,4\}, m_{j,k} \in M_{d1}\}}{4}$
 - 12: $\text{index}_{d2}^{\text{conf}} = \frac{\sum\{m_{j,k} \mid j=\text{conf}, k \in \{1,2,3,4\}, m_{j,k} \in M_{d2}\}}{4}$
 - 13: $\text{index}_{\text{conf}} = \text{index}_{d1}^{\text{conf}} + \text{index}_{d2}^{\text{conf}}$
 - 14: **end for**
 - 15: El nodo n_i escoge la configuración cuyo index sea el menor
-

4.4. Algoritmo de tercias

El algoritmo de tercias, también considera a sus dos vecinos más cercanos, pero ahora lo hace de manera simultánea. Esto significa que se forma una tercia compuesta del AP que va a cambiar de configuración y sus dos vecinos más cercanos. Cabe señalar que, a pesar de las similitudes con el algoritmo de dos parejas, en este caso el usuario debe llevar a cabo 64 experimentos, en contraste con los 32 experimentos que debía realizar en el algoritmo de dos parejas.

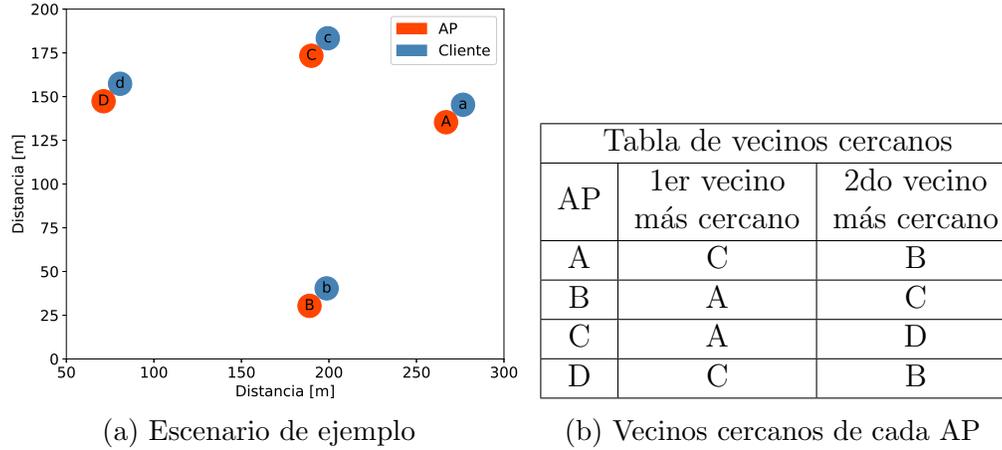


Figura 4.7: Topología y tabla de vecinos

Metodología para el cambio de configuración

Dado un conjunto de nodos definido como $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$, donde cada nodo $n_i \in N$ identifica sus vecinos más cercanos.

Etapa 1:

- Paso 1: Calcular el conjunto $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$, donde $\text{dist}()$ representa la distancia euclidiana.
- Paso 2: El conjunto D_i debe ser ordenado: $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$.
- Paso 3: Ahora el nodo n_i puede estimar el subconjunto $N_i \subset N$, definido por $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_2\}$. Donde únicamente considera a sus 2 vecinos más cercanos de manera simultánea.

En este caso en particular, el conjunto N_i contendrá únicamente a los dos vecinos más cercanos a n_i , al igual que en el caso anterior, el nodo n_i deberá estimar el valor de métrica obtenido para las 64 configuraciones posibles con sus dos vecinos más cercanos de manera simultánea, pero aislados del resto de la red.

Etapa 2:

- Paso 4: Con base en la posición geográfica de los nodos $d1, d2 \in N_i$, el nodo n_i simula los 64 escenarios posibles entre estos tres nodos. Con base en estos resultados, n_i obtiene el conjunto $M = \{m_{j,k,l} \mid j, k, l \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(d1), l = \text{conf}(d2)\}$. El valor de $m_{j,k,l}$ estará definido por la métrica de fairness (previamente descrita) del resultado de la simulación cuando el nodo n_i utiliza la configuración j , el nodo $d1$ utiliza la configuración k , y el nodo $d2$ utiliza la configuración l .

- Paso 5: Los resultados de las simulaciones son ordenados con base en la métrica dada, $\hat{M} = \{m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_{64}\}$.
- Paso 6: El nodo n_i escoge la configuración con la mejor métrica del conjunto \hat{M} , si hay un empate escogerá una de forma aleatoria.

Ejemplo de operación del algoritmo

Para este ejemplo de operación utilizaremos la topología descrita en la figura 4.7a.

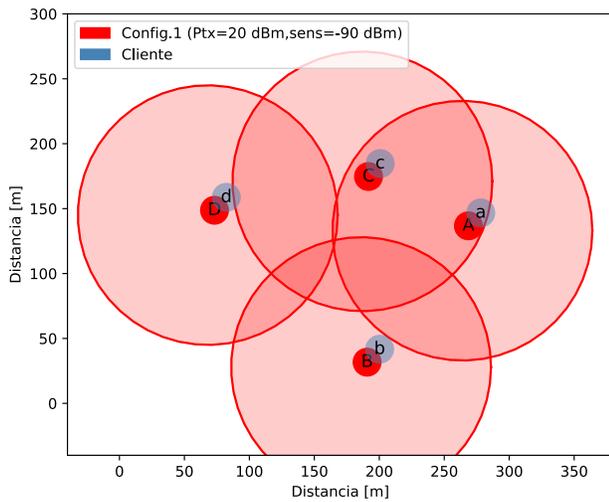
Inicialización: El algoritmo de tercias también considera a sus dos vecinos más cercanos, su diferenciador es considerarlos simultáneamente, a diferencia del algoritmo de dos parejas.

En este caso se formarían tres tercias, la primera tercia formada por (A, C y B), la segunda tercia estaría conformada por (C, A y D) y la tercera está conformada por (D, C y B), ver figura 4.7. Para cada una de estas tercias se están considerando las 64 combinaciones correspondientes de la forma $4^3=64$ para cada una.

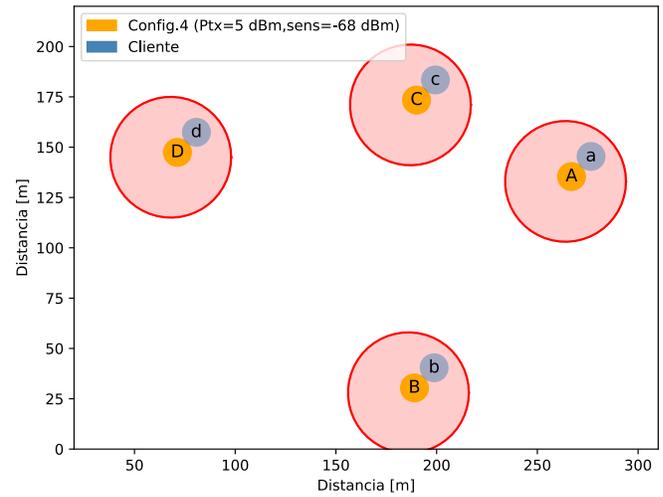
Ejecución del algoritmo: Se considera nuevamente que cada AP del escenario comienza con configuración 1 (ver figura 4.8a).

Una vez que se han obtenido las tercias, los experimentos de cada tercia y sus resultados de métrica compuesta son requeridas por el algoritmo como entradas para asignar nuevas configuraciones a cada uno de los AP.

Finalmente se muestra en la figura 4.8b las nuevas configuraciones.



(a) AP en configuración inicial



(b) AP con nuevas configuraciones asignadas

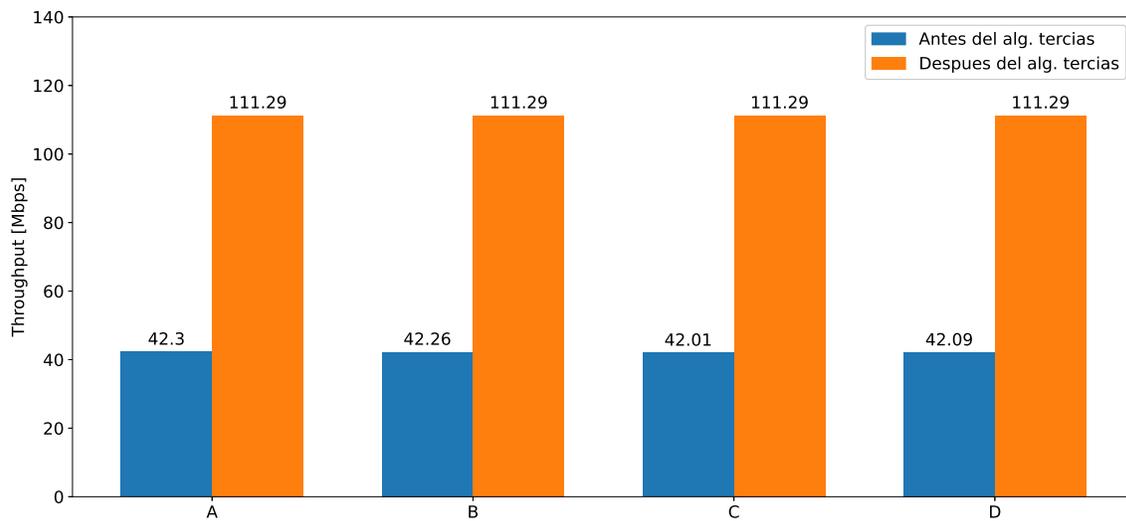
(c) Comparativa en *throughput*

Figura 4.8: Ejemplo de operación del algoritmo de tercias.

Pseudocódigo del algoritmo de tercias

En esta sección se muestra el pseudocódigo del algoritmo de tercias. Dado que el algoritmo funciona de forma distribuida, cada AP deberá ejecutar el mismo código para obtener la configuración que mejora su rendimiento.

Algoritmo 4 Algoritmo de tercias

Entrada: $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$

- 1: Inicialización del algoritmo
 - 2: Etapa 1
 - 3: Calcular $D_i = \{d_j = \text{dist}(n_i, n_j) \mid j = 1, 2, \dots, n; i \neq j\}$; dist=(distancia euclidiana)
 - 4: ordenar D_i : $\hat{D}_i = \{\hat{d}_j \mid \hat{d}_1 < \hat{d}_2 < \dots < \hat{d}_{n-1}\}$
 - 5: $N_i \subset N$; $N_i = \{n_k \in N \mid d(n_i, n_k) \leq \hat{d}_1\}$.
 - 6: Etapa 2
 - 7: El nodo n_i considera a los nodos $d1, d2 \in N_i$
 - 8: El nodo n_i lleva a cabo las simulaciones y obtiene el conjunto $M = \{m_{j,k,l} \mid j, k, l \in \{1, 2, 3, 4\}; j = \text{conf}(n_i), k = \text{conf}(d1), l = \text{conf}(d2)\}$
 - 9: Se ordena el conjunto M , $\hat{M} = \{m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_{64}\}$.
 - 10: n_i asigna la configuración con la mejor métrica, si hay un empate escoge de forma aleatoria.
-

Capítulo 5

Pruebas y resultados

5.1. Simulador Komondor

Komondor es un simulador de red inalámbrica para redes de área local inalámbricas (WLAN) de próxima generación. Este simulador ha sido concebido como una herramienta de código abierto accesible para la investigación sobre redes inalámbricas. Una ventaja importante de Komondor sobre otros simuladores inalámbricos conocidos, radica en su alta tasa de procesamiento de eventos, que se obtiene mediante la simplificación de la operación principal. Esto permite superar el tiempo de ejecución de otros simuladores como ns-3, por lo que admite escenarios a gran escala con una gran cantidad de nodos. El funcionamiento de Komondor está validado en una variedad de escenarios contra diferentes herramientas: El simulador ns-3 y dos herramientas analíticas basadas en Redes de Márkov de Tiempo Continuo (CTMNs) y el modelo DCF de Bianchi [25]. Los resultados muestran que Komondor captura la operación IEEE 802.11 de manera muy similar a ns-3. Finalmente, el potencial de Komondor para simular entornos complejos, incluso con soporte de aprendizaje (*machine learning*), para redes WLAN de próxima generación mediante el desarrollo fácil de nuevos módulos de código definidos por el usuario [26].

Simuladores tradicionales como NS-3, NS-2, OMNET y OPNET, entre muchos otros, simulan la transmisión y recepción de paquetes. Por ejemplo, para simular una red sencilla de un nodo y un cliente, se debe definir el modelo de tráfico, un agente que lo genere y otro que lo reciba, definir el tiempo de simulación, el tamaño de paquete entre otros parámetros propios del protocolo 802.11 y las transmisiones inalámbricas. Donde cada paquete recibido y transmitido genera un evento, que contiene datos tales como, quién envió este paquete, el tamaño, la duración del evento, la dirección IP de destino, entre muchos más que pueden ser de interés. Una vez terminada la simulación los datos generados son tratados para obtener métricas como *throughput*, retardo y colisiones. La ventaja de este tipo de simuladores, es que proveen muchos detalles de cada paquete y es posible saber qué es lo que ocurre con un paquete específico para ver su comportamiento durante su transmisión. El principal problema del uso de estos simuladores, es que para poder obtener una métrica en particular, por ejemplo *throughput*, es necesario transmitir muchos paquetes, lo que significa una simulación muy extensa.

Contrario a este paradigma tradicional, Komondor traduce una topología de red en una cadena markoviana y al resolverla encuentra el *throughput* individual de los AP en estado estable.

Modelo de propagación indoor (Komondor)

El modelo de propagación ‘indoor 2’, propio del simulador Komondor, fue utilizado para realizar los diversos escenarios presentados en este trabajo. Se trata de un modelo de propagación simple para simular escenarios típicos como pisos, escuelas o restaurantes. De acuerdo con este modelo, la pérdida (L_{indoor}) experimentada durante la transmisión es:

$$L_{indoor} = PL_f + 10\alpha \log_{10}(d) + h_s + \left(\frac{d}{f_w}\right) h_o, \quad (5.1)$$

en donde PL_f es el factor de pérdida de trayectoria, α es una constante que depende del modelo de propagación, d es la distancia en metros entre el transmisor y el receptor, h_s es el factor de sombra, f_w es la distancia de separación entre muros y h_o el factor de obstáculos [26].

5.2. Pruebas para el algoritmo de selección de canal

Los escenarios de prueba para realizar esta tesis fueron definidos con parámetros y características propias del protocolo IEEE 802.11 así como de entornos con alta densidad de puntos de acceso. Para todos los experimentos presentados, el primer paso es contar con una topología que contenga los puntos de acceso con su correspondiente dispositivo cliente.

Experimentos

Para los experimentos realizados se definieron escenarios en un área cuadrada de 300×300 , 600×600 y 900×900 metros, donde están dispuestos nueve puntos de acceso distribuidos de manera uniforme con un cliente asociado a cada uno de ellos. La razón de considerar un único cliente es establecer una referencia que permita estimar el *throughput* obtenido durante la transmisión. De igual manera, el considerar solo un cliente por AP reduce la complejidad del problema a resolver. Otro aspecto importante de todos los experimentos es que el tráfico generado es de tipo descendente (*Downlink*), de cada AP a su cliente. Lo anterior porque se ha encontrado que en la práctica más del 90 % del tráfico es *downlink*.

La densidad de puntos de acceso queda entonces definida por las dimensiones del escenario. Para el caso de un escenario de 300×300 metros, los puntos de acceso están muy cerca uno del otro y distribuidos uniformemente en toda el área, lo que incrementa notablemente la interferencia que observa cada uno de los AP. Conforme las dimensiones del escenario se incrementan, los AP quedan más separados unos de otros, reduciendo la interferencia entre ellos. Una forma de cuantificar esta densidad de AP por unidad de área es a través de la distancia promedio que existe entre un punto de acceso y el resto de sus vecinos. De manera que mientras más cercanos estén los puntos de acceso, esta distancia será menor. Precisamente los escenarios que se escogieron (300×300 , 600×600 y 900×900) permiten visualizar el efecto que tiene la interferencia cocanal antes y después de la implementación del algoritmo.

Distancia promedio y densidad de los escenarios

La distancia existente entre puntos de acceso en una red inalámbrica afecta directamente al rendimiento de cada punto de acceso de la red. Esto se debe al comportamiento propio de los radios IEEE 802.11, a la configuración preestablecida por el fabricante al momento de ser instalados y al lugar en que serán colocados.

La distancia entre cada uno de los puntos de acceso es calculada con la ecuación 5.2 de distancia euclidiana:

$$d_{(p1,p2)} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5.2)$$

donde (x_1, y_1) son las coordenadas del punto de acceso número uno y (x_2, y_2) son las coordenadas del punto de acceso número dos. Estas coordenadas se asumen como conocidas mediante GPS. Esta distancia es importante para la asignación del canal del punto de acceso sobre el cual se ejecuta el algoritmo.

La distancia promedio considera las distancias de los dos AP vecinos más cercanos, que en consecuencia serán los que tengan la distancia más corta. En específico, la distancia promedio del escenario se refiere a la distancia existente desde un AP hacia todos los demás AP que están desplegados en la red, dividida entre el número de distancias no repetidas.

La distancia promedio puede expresarse como la media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_n}{N} \quad (5.3)$$

Por ejemplo, para un escenario conformado de cuatro AP, se calculan las distancias A-B, A-C, A-D, C-D, B-C y B-D. Por ejemplo, si consideramos el escenario de ejemplo (figura 3.5a) y la tabla 3.5b, la distancia promedio del escenario es de 140.66 m. Sustituyendo los valores del escenario de ejemplo se obtiene la distancia promedio de este escenario anterior mencionada:

$$\bar{X} = \frac{130.80 + 85.86 + 143 + 196.36 + 166.17 + 121.80}{6} = 140.66 \text{ m.} \quad (5.4)$$

Búsqueda de fuerza bruta

Los escenarios pertenecientes a estos experimentos consisten en un área cuadrada con las dimensiones antes descritas donde están dispuestos nueve AP con un cliente conectado a cada uno de ellos. En una simulación de fuerza bruta, todas las combinaciones de canal posibles son experimentadas en el simulador usando Komondor, y se selecciona como la mejor de ellas la que obtenga el menor valor de la métrica. El número de combinaciones posibles cuando se tienen n canales y r AP es:

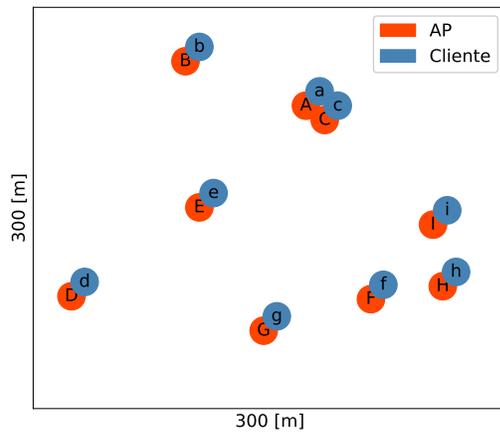
$${}^n P_r = n^r \quad (5.5)$$

Para el caso particular cuando se tienen nueve AP distribuidos de forma aleatoria y tres canales ortogonales, se obtiene el siguiente número de combinaciones posibles:

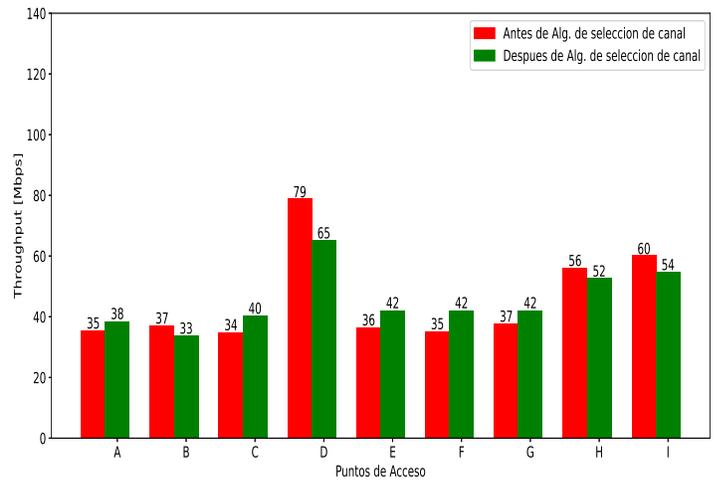
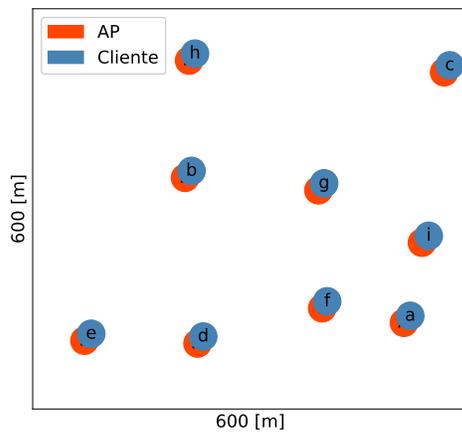
$${}^3 P_9 = 3^9 = 19,683 \quad (5.6)$$

Escenarios de fuerza bruta

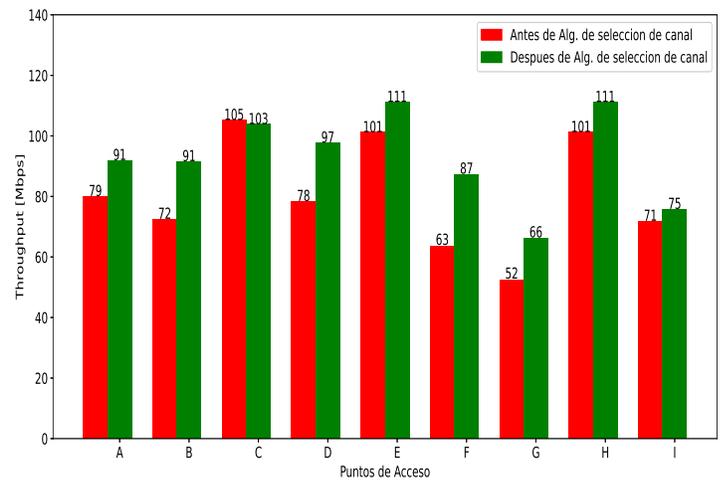
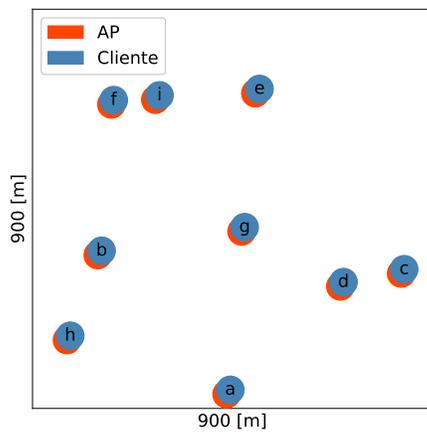
Los escenarios de fuerza bruta están definidos en un área cuadrada con dimensiones de 300×300 , 600×600 y 900×900 metros. Los resultados obtenidos para estos escenarios se muestran en las figuras 5.1b, 5.1d y 5.1f, respectivamente. La figura 5.1 se compone de dos segmentos. El primero muestra los escenarios de los experimentos. El segundo muestra los resultados de *throughput* obtenido por cada AP antes y después de la implementación del algoritmo de selección de canal. Dentro de cada figura 5.1b, 5.1d y 5.1f se muestra la comparativa de los resultados. La primera barra muestra el *throughput* obtenido por cada AP antes de la asignación de canales, previo a la implementación del algoritmo. La segunda barra muestra el *throughput* ahora obtenido después de la asignación de canales, resultado de la implementación del algoritmo. Dado que el número de simulaciones se incrementa considerablemente, para todos los experimentos posteriores, fue tomada una muestra representativa.



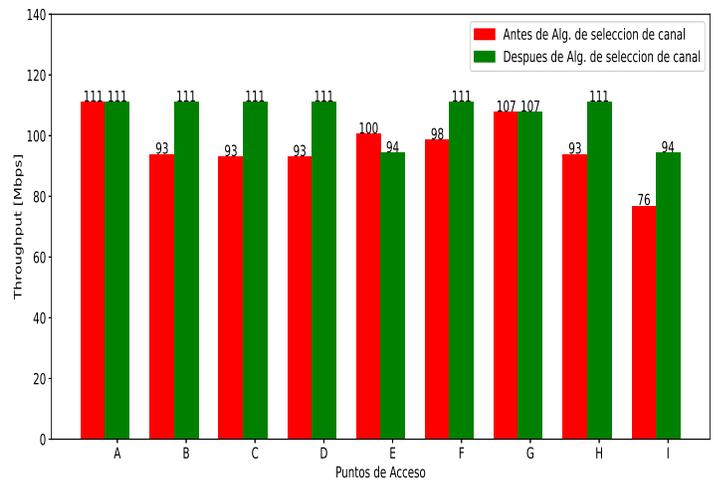
(a) Escenario de 300 x 300

(b) Comparativa de *throughput* escenario 300 x 300

(c) Escenario de 600 x 600

(d) Comparativa de *throughput* escenario 600 x 600

(e) Escenario de 900 x 900

(f) Comparativa de *throughput* escenario 900 x 900Figura 5.1: Gráfica comparativa de *throughput* para los escenarios

Los resultados presentados en las figuras anteriores muestran la ganancia del algoritmo propuesto de selección de canal con respecto de una asignación de canales predeterminada.

La figura 5.1b muestra que la mayoría de los AP experimentan una leve mejoría en el *throughput*, y solo en pocos AP el resultado es el opuesto. La poca mejora en el *throughput* para este escenario se debe a que los AP están muy cerca unos de otros (escenario de 300×300 metros), generando mucha interferencia aún después de asignar los mejores canales de operación para cada AP.

En la figura 5.1d se muestra que la ganancia en *throughput* de cada AP par un escenario de 600×600 metros. En dicha figura se observa que la ganancia en *throughput* es muy superior al del escenario de 300×300 . Lo anterior se debe a que la distancia promedio entre AP es mayor, reduciendo la interferencia en comparación del escenario anterior.

Finalmente, la figura 5.1f muestra el *throughput* de cada AP para un escenario de 900×900 metros. Nuevamente la ganancia en *throughput* que observa cada AP es menor en comparación del escenario de 600×600 . Lo anterior se debe a que los AP están lo bastante separados para no interferir entre ellos independientemente del canal que usen.

Muestra representativa

El número de combinaciones de los canales existentes para este escenario son 19,683, lo que resulta ser una cantidad significativamente elevada de experimentos a realizar. Por esta razón se decidió tomar una muestra representativa para hacer más sencilla la tarea de simular los siguientes escenarios. Con la selección de esta muestra representativa se tienen en consideración las normas estadísticas, donde se definió que esta muestra debería de tener un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %; A continuación se detalla la ecuación 5.7 y el procedimiento utilizado para la obtención de esta muestra representativa [27].

$$n = \frac{N \cdot z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q} \quad (5.7)$$

Donde n = Tamaño de muestra

N = Tamaño de la población o universo

z = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza

e = Error de estimación de máximo aceptado

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado(éxito)

q = (1-p) Probabilidad de que No ocurra el evento estudiado

Donde se sustituye con los siguientes valores:

$$N = 19,683$$

$$z = 95 \% (\text{corresponde un coeficiente de confianza de } 1.96)$$

$$e = 5 \%$$

$$p = 50 \%$$

$$q = 5 \%$$

y sustituyendo en la fórmula:

$$\frac{19,683 \cdot (1.96)^2 \cdot (0.5) \cdot (0.5)}{(0.05)^2 \cdot (19,683 - 1) + (1.96)^2 \cdot (0.5) \cdot (0.5)} = 376.82 \approx 377 \text{ experimentos} \quad (5.8)$$

Resultando en que la muestra debe estar compuesta de 377 elementos, los cuales fueron elegidos de manera aleatoria dentro de las 19,683 posibles.

Escenarios de experimentos

Esta serie de experimentos estuvieron conformados de diversas topologías, donde nueve puntos de acceso fueron distribuidos de manera aleatoria. Para estos, sus clientes están a 10 metros de separación. Estos escenarios comienzan para un área de 150×150 , 300×300 , 600×600 , 900×900 , 1200×1200 hasta una de 1800×1800 metros.

Resultados del algoritmo de selección de canal

La siguiente gráfica 5.2 presenta el resultado de la implementación del algoritmo de selección de canal propuesto. Para explicar esta gráfica correctamente se debe visualizar de izquierda a derecha, en el eje "X" está la distancia promedio entre los puntos de acceso de cada experimento y en el eje "Y" está el valor de la ganancia en *throughput* del algoritmo de selección de canal. La ganancia del *throughput* está en términos de la diferencia entre el *throughput* obtenido por una selección de canales hecha por nuestro algoritmo y una asignación aleatoria de canales. En esta figura, la gráfica azul es la diferencia en *throughput*, entre lo obtenido por el algoritmo contra lo obtenido de manera aleatoria. La línea naranja es la versión suavizada de la gráfica azul, resultado de un *moving average*.

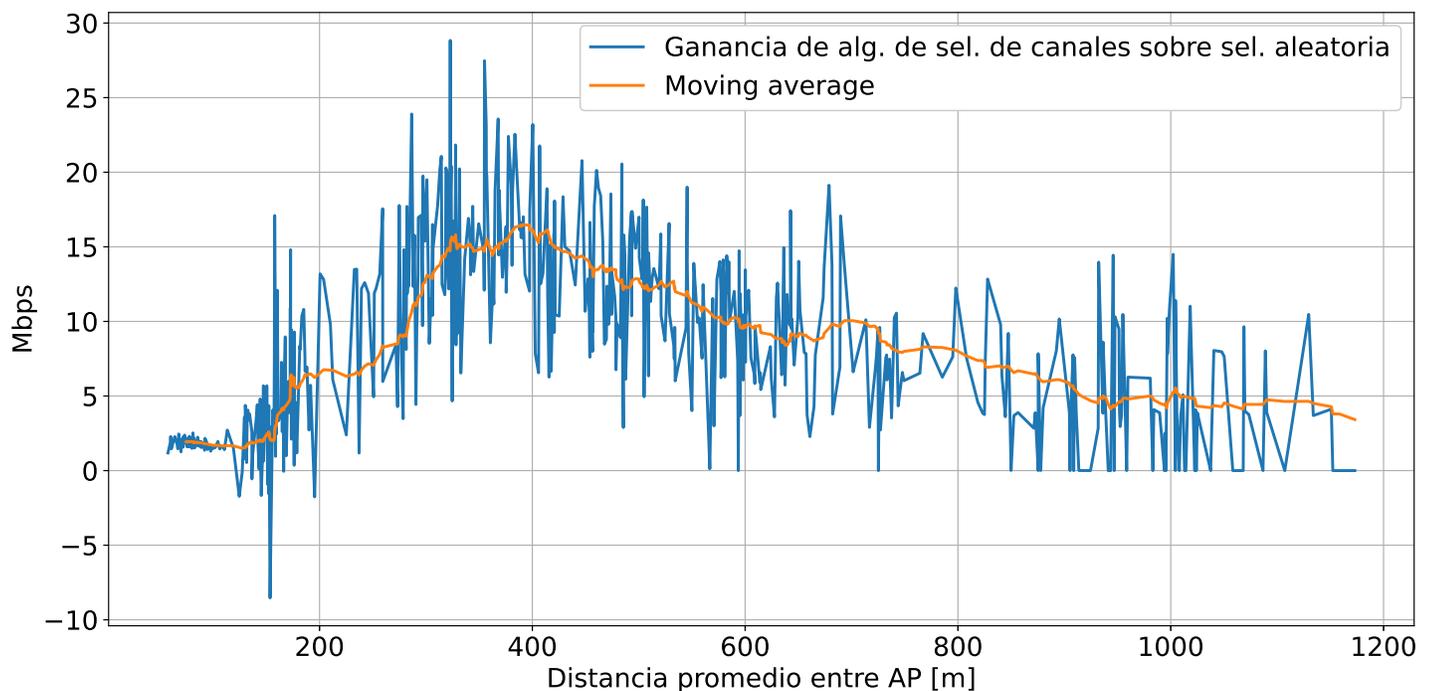


Figura 5.2: Gráfica de resultados del algoritmo de cambio de canal

En la figura 5.2 es posible notar que para una distancia promedio cercana a los 400 m la asignación de canales hecha por el algoritmo de selección de canal obtiene alrededor de 15 Mbps adicionales con respecto de la asignación aleatoria. En la parte izquierda de la misma figura, es posible notar que la línea naranja se acerca a cero, lo cual significa que casi no hay ganancia del algoritmo propuesto con respecto a aleatorio. La razón principal de esto radica en que la distancia promedio entre nodos es tan pequeña que no importa qué asignación de canales se elija ni tampoco qué tan eficiente sea el algoritmo, no habrá mucha ganancia con respecto a una selección aleatoria por que los nodos están demasiado juntos, y siempre están interfiriendo entre sí. Por lo que respecta al lado extremo derecho de la figura 5.2, la mejora del algoritmo propuesto respecto a aleatorio también resulta muy poca. Esto es debido a que la separación entre cada punto de acceso es tan grande que realmente no importa qué canal se elija, no hay interferencia entre los AP. Lo más destacable de la figura está situado en el rango de 200 m a 600 m, donde el algoritmo de selección de canal propuesto obtiene mayor rendimiento para cada punto de acceso. Esto debido a que la separación entre los puntos de acceso permite que el algoritmo encuentre la mejor asignación de canal para cada nodo de la red, siendo en este rango donde la ganancia está por encima de los 10 Mbps.

5.3. Pruebas para los algoritmos de potencia de transmisión y umbral de sensado

Escenarios para comparar contra los algoritmos propuestos

Default: En primer lugar, está el resultado obtenido sin aplicar ningún algoritmo. Cada AP tiene un canal de operación aleatorio y configuración 1; esto con el fin de tener base de comparación. Se considera el *default* dado que es la forma en que se instalan los AP en domicilios y oficinas.

Alg. cambio de canal: Es el algoritmo de cambio de canal descrito en la sección 3.2. Para los siguientes 3 algoritmos se implementó primero el algoritmo de cambio de canal sobre los escenarios, y posteriormente se aplicó el algoritmo de una pareja, dos parejas y tercias.

Alg. una pareja: El algoritmo de una pareja, este algoritmo únicamente considera únicamente a su primer vecino más cercano.

Alg. dos parejas: El algoritmo de dos parejas considera a sus dos vecinos más cercanos. Pero experimenta con uno a la vez.

Alg. tercias: El algoritmo de tercias, considera a sus dos vecinos más cercanos, pero simultáneamente.

Escenarios de nueve nodos

En esta sección fueron seleccionadas varias topologías diferentes, cada una fue seleccionada del conjunto de experimentos de 300×300 , 600×600 , 900×900 , 1200×1200 y 1800×1800 . Sin embargo, aun cuando el escenario considera un área cuadrada específica, dicha distancia no corresponde a la distancia promedio medida en cada caso. Esto se debe principalmente en primer lugar, la forma en la que se mide la distancia promedio, en segundo lugar, a que la ubicación de los nodos dentro del área fue determinada de forma estocástica. A continuación se presenta la tabla 5.1 para representar mejor esta situación.

Escenarios de nueve nodos	
Serie de experimentos	Distancia promedio real del escenario [m]
300×300	158.72
600×600	306.68
900×900	609.32
1200×1200	936.27
1800×1800	1150.91

Cuadro 5.1: Tabla de distancias de experimentos

La tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos para un solo experimento, en este caso se muestra para la serie de experimentos para la distancia promedio entre AP de 300m. En ella se desglosa el *throughput* obtenido de manera general, así como el obtenido por cada AP del escenario antes y después de ejecutar los algoritmos propuestos.

Tabla de resultados finales nueve nodos- <i>throughput</i> [Mbps]					
	<i>Default</i>	Algoritmo de selección de canal	Alg. canal + Alg. 1 pareja	Alg. canal + Alg. 2 parejas	Alg. canal + Alg. tercias
Promedio general	49.05	52.43	111.29	111.29	111.29
A	51.69	54.23	111.29	111.29	111.29
B	54.63	48.55	111.29	111.29	111.29
C	33.50	30.32	111.29	111.29	111.29
D	50.84	58.76	111.28	111.29	111.29
E	95.21	104.64	111.29	111.29	111.29
F	33.55	46.06	111.29	111.29	111.29
G	51.35	55.42	111.29	111.29	111.29
H	35.47	31.70	111.29	111.29	111.29
I	35.17	42.19	111.28	111.29	111.29

Cuadro 5.2: Tabla de resultados para el experimento de 9 AP

Los resultados obtenidos para 9 AP en escenarios con diferentes distancias promedios se presentan en las siguientes figuras. En la figura 5.3a se muestra el *throughput* obtenido para los diferentes algoritmos propuestos. En esta figura se muestra el *throughput* absoluto obtenido para las diferentes distancias promedio de los escenarios.

La figura 5.3b muestra el promedio de diferencias de *throughput* de los algoritmos propuestos con respecto del *default*. Esta gráfica muestra entonces la “ganancia” de usar los algoritmos propuestos sobre el algoritmo *Default* medido en Mbps. Finalmente, la figura 5.3c muestra la ganancia promedio en *throughput* de los tres algoritmos con respecto del algoritmo de cambio de canal.

Lo más destacado de estas gráficas se encuentra en la parte izquierda de las mismas, donde se observa una ganancia de los tres algoritmos propuestos de selección de potencia de transmisión y umbral de sensado con respecto al algoritmo de selección de canal. Por otro lado, se observa poca ganancia de los mismos tres algoritmos a partir de los 600 m. Lo anterior debido a que, para distancias superiores a las 600 m, los AP están muy separados unos de otros, de tal forma que no importa que configuración elijan, no afecta que tanto interfieren a sus vecinos.

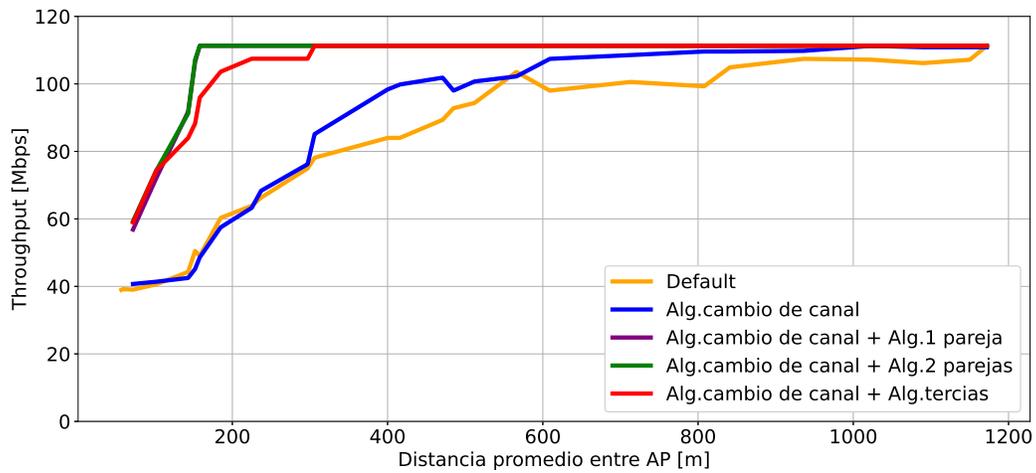
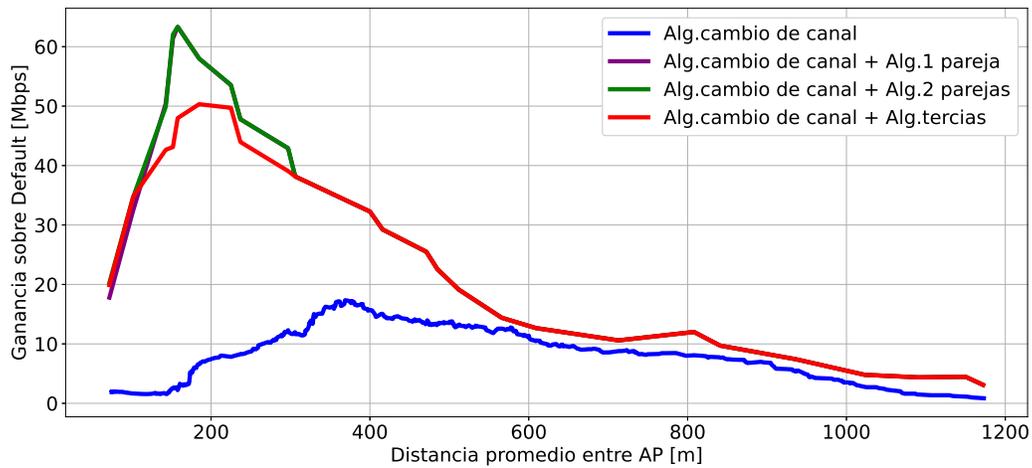
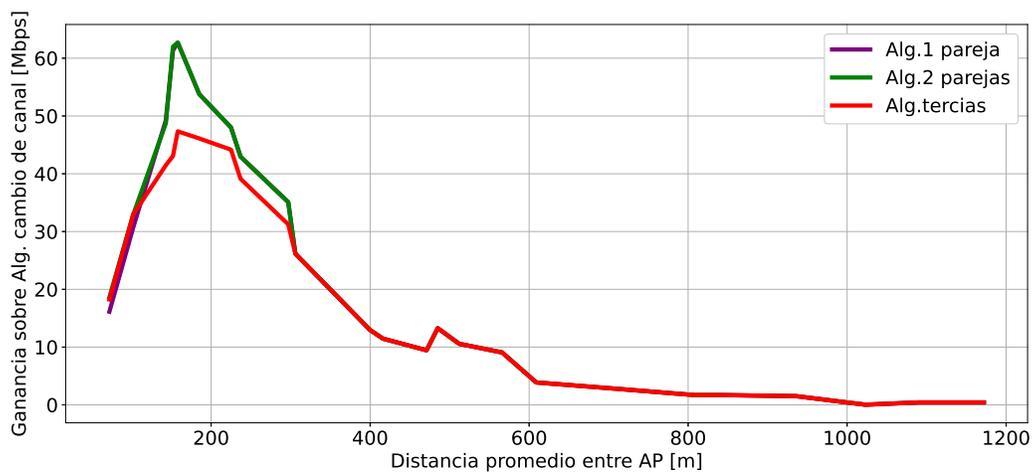
(a) Resultados de *throughput* absoluto(b) Resultados de diferencias de *throughput* con respecto de *default*(c) Resultados de diferencias de *throughput* con respecto del algoritmo de cambio de canal

Figura 5.3: Resultados del experimento de nueve AP

Escenarios de 12 nodos

Esta sección contiene una serie de escenarios compuestos de 12 AP, donde se establecieron áreas cuadradas de 50×50 , 100×100 , 200×200 , 300×300 , 400×400 , 500×500 y 600×600 metros. A continuación se presenta la tabla 5.3, con las distancias promedio correspondientes a cada escenario considerado.

Escenarios de 12 nodos	
Serie de experimentos	Distancia promedio real del escenario [m]
50×50	50.35
100×100	111.21
200×200	217.44
300×300	306.57
400×400	412.08
500×500	519.57
600×600	606.75

Cuadro 5.3: Tabla de distancias de los experimentos

Para esta serie se consideró una configuración general de los escenarios que a continuación se describe:

- *Default*: Canales asignados aleatoriamente

La tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos para una sola distancia promedio en este caso que corresponde a 100 m. En ella se desglosa el *throughput* obtenido, así como el obtenido por cada AP del escenario antes y después de ejecutar los algoritmos propuestos.

Tabla de resultados finales 12 nodos - <i>throughput</i> [Mbps]					
	<i>Default</i>	Algoritmo de selección de canal	Alg. canal + Alg. 1 pareja	Alg. canal + Alg. 2 parejas	Alg. canal + Alg. tercias
Promedio general	32.64	33.58	93.39	93.39	102.20
A	32.95	32.20	110.51	0.84	111.29
B	33.63	33.03	111.29	111.29	2.26
C	34.86	33.72	59.39	59.41	111.29
D	34.90	39.03	111.29	111.29	111.29
E	32.31	30.98	111.29	111.29	111.29
F	31.44	31.59	111.29	111.29	111.28
G	32.14	31.46	111.29	111.29	111.29
H	35.54	31.67	111.29	111.29	111.29
I	32.12	31.44	111.29	111.28	111.29
J	27.75	33.74	59.64	59.54	111.28
K	33.14	32.20	111.29	110.56	111.29
L	32.88	41.91	0.78	111.29	111.29

Cuadro 5.4: Tabla de resultados para el experimento de 12 AP

Los resultados obtenidos se presentan a continuación. La figura 5.4a muestra el desempeño de los tres algoritmos propuestos, el algoritmo de selección de canal y el algoritmo default para diferentes distancias promedio entre los AP para el caso de 9 AP. En general, todos los algoritmos mostrados muestran una tendencia creciente de *throughput* para cada AP conforme se incrementa la distancia promedio entre AP, lo cual se explica por la menor interferencia entre ellos.

Tomando como base la figura 5.4a, la figura 5.4b muestra la ganancia promedio de los tres algoritmos propuestos y el algoritmo de selección de canal adicional con respecto al algoritmo *default*. Como se puede observar en dicha gráfica, los algoritmos propuestos logran ganancias de hasta 60 Mbps comparado con el algoritmo *default*. De los tres algoritmos propuestos, los algoritmos de una y dos parejas obtienen el mejor rendimiento, mientras que el algoritmo de tercias obtuvo un rendimiento ligeramente inferior.

Finalmente, tomando nuevamente como referencia la figura 5.4a, la figura 5.4c muestra la ganancia adicional de los tres algoritmos propuestos con respecto al algoritmo de selección de canal (recordar que los tres algoritmos propuestos funcionan después de aplicar el algoritmo de selección de canal). Como se puede observar en la gráfica, los tres algoritmos propuestos muestran una ganancia adicional muy significativa con respecto al algoritmo de selección de canal, y esta ganancia se concentra en el rango de distancias promedio entre 100 m y 400 m.

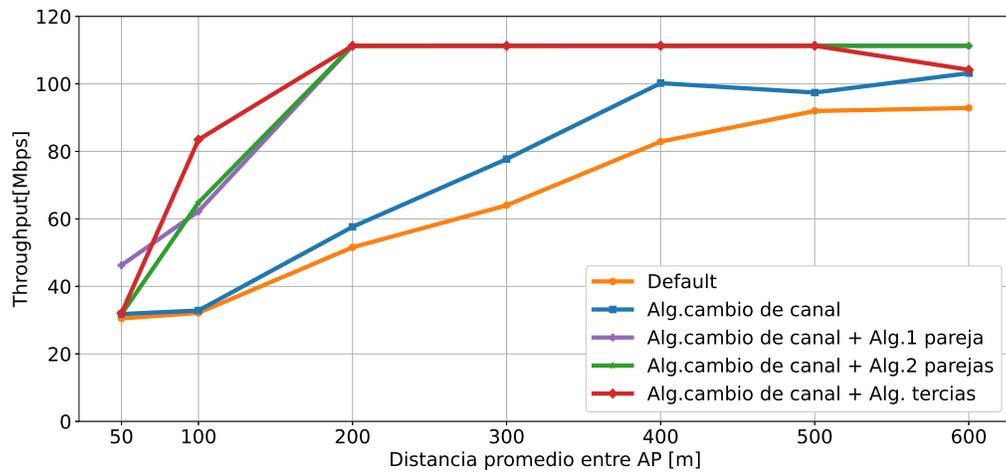
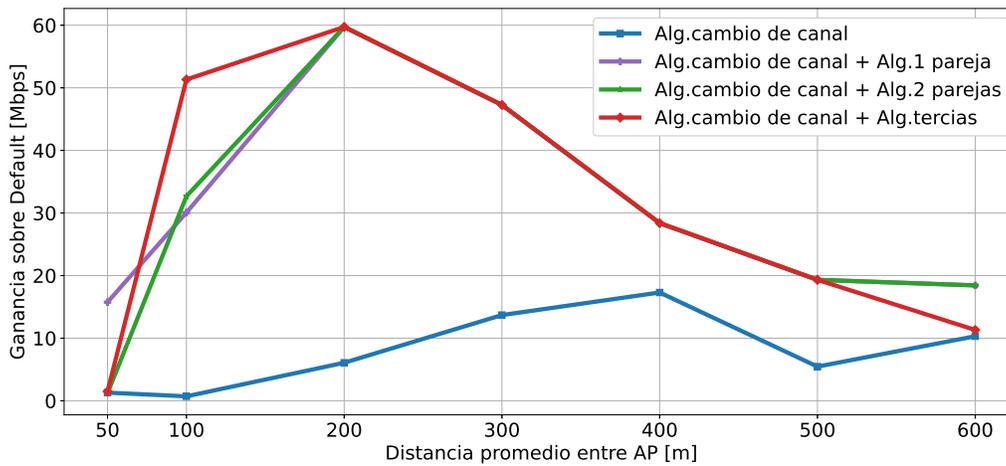
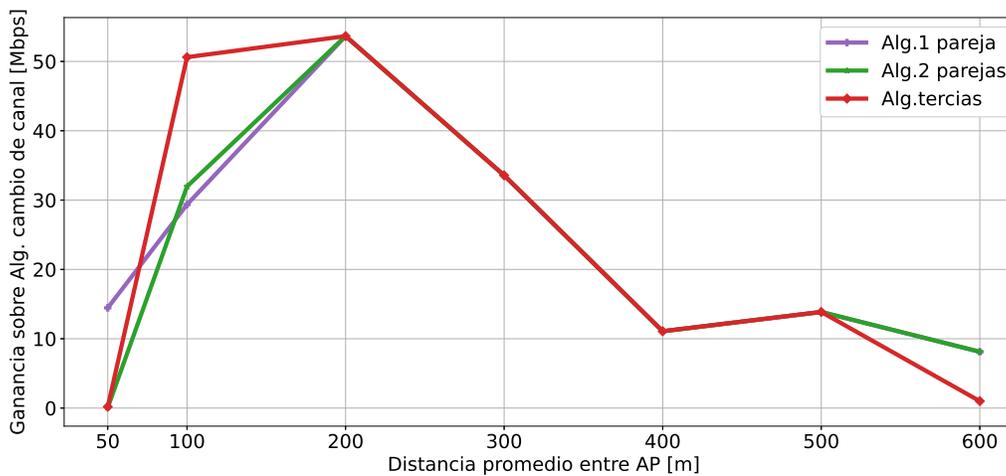
(a) Resultados de *throughput* absoluto(b) Resultados de diferencias de *throughput* con respecto de *default*(c) Resultados de diferencias de *throughput* con respecto del algoritmo de cambio de canal

Figura 5.4: Resultados del experimento de 12 AP

Escenarios de 15 nodos

Esta serie de escenarios contempla de 15 nodos, donde una vez que se ha aplicado el algoritmo de canal, se generaron tres grupos de cinco nodos separados por los canales ortogonales (1,6,11). Posteriormente se implementaron los algoritmos propuestos sobre un único grupo compuesto de cinco nodos con el mismo canal. La tabla 5.5 muestra los resultados obtenidos. En ella se desglosa el *throughput* obtenido de manera general, así como el obtenido por cada AP del escenario antes y después de los algoritmos propuestos.

Tabla de resultados finales 15 nodos- <i>throughput</i> [Mbps]					
	<i>Default</i>	Algoritmo de selección de canal	Alg. canal + Alg. 1 pareja	Alg. canal + Alg. 2 parejas	Alg. canal + Alg. tercias
Promedio general	54.22	111.29	104.55	107.86	107.53
A	43.81	111.29	111.28	111.28	111.29
B	32.11	111.29	111.29	111.29	111.29
C	68.19	111.29	59.94	111.29	111.29
D	49.46	111.29	111.29	111.29	111.29
E	61.16	111.29	111.29	111.29	111.29
F	45.87	111.29	111.29	111.29	111.29
G	35.19	111.29	111.29	111.29	111.29
H	66.69	111.29	111.29	111.29	111.29
I	44.61	111.29	61.58	59.94	55.01
J	59.43	111.28	111.29	111.29	111.29
K	47.99	111.29	111.29	111.29	111.29
L	28.13	111.29	111.29	111.29	111.29
M	88.39	111.29	111.29	111.29	111.29
N	68.90	111.28	111.29	111.29	111.29
O	73.51	111.29	111.29	111.29	111.29

Cuadro 5.5: Tabla de resultados para el experimento de 15 AP

La figura 5.5a muestra el *throughput* absoluto obtenido por cada uno de los algoritmos propuestos y el algoritmo *default*. Debido a limitaciones de procesamiento, solo se llevaron a cabo experimentos para una sola distancia promedio, lo cual explica que el *throughput* del algoritmo *default* fuese el mismo en todos los experimentos mostrados.

En la figura 5.5b se muestra la ganancia de los 4 algoritmos propuestos (uno de selección de canal y los tres de selección de potencia de transmisión y umbral de sensado) con respecto al algoritmo *default*. Como se puede observar, el algoritmo de selección de canal logra una mejora promedio en cada AP de 20-30 Mbps con respecto al algoritmo *default*. Lo anterior es debido a un mejor selección de canales para cada AP, lo cual reduce la interferencia de un AP con sus vecinos más cercanos. Finalmente, los tres algoritmos propuestos de selección de potencia de transmisión y umbral de sensado logran ganancias promedio en cada AP de entre 60 – 70 Mbps.

Finalmente, la figura 5.5c muestra la ganancia de los algoritmos de una pareja, dos parejas y tercias adicionales al algoritmo de selección de canal. Desafortunadamente, solo se pudieron hacer 10 experimentos, el resultado final de cada experimento varía mucho dependiendo de la ubicación de los AP. En promedio, el algoritmo de una pareja, dos parejas y tercias obtienen una mejora promedio en

cada AP de entre 35 y 50 Mbps.

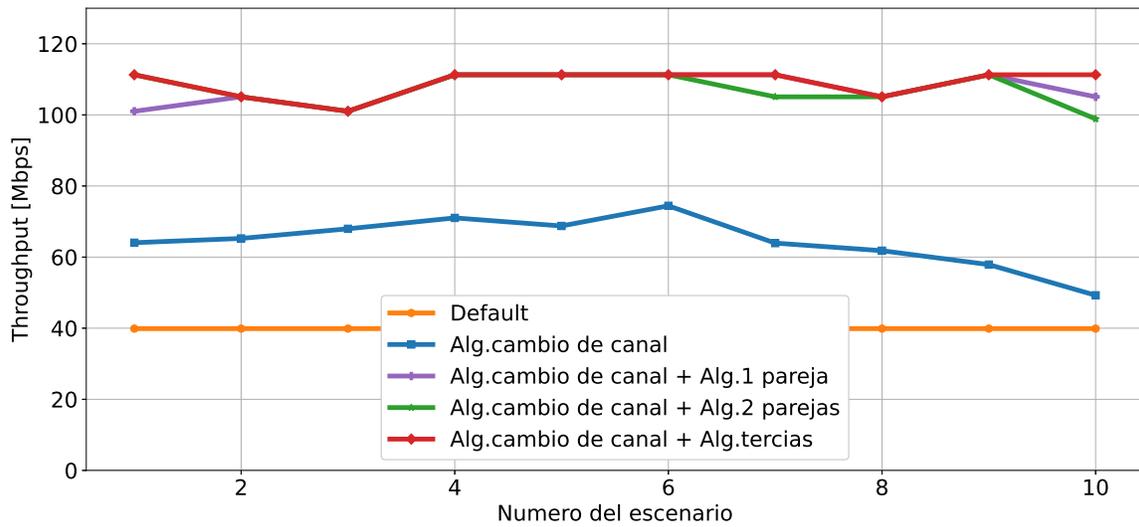
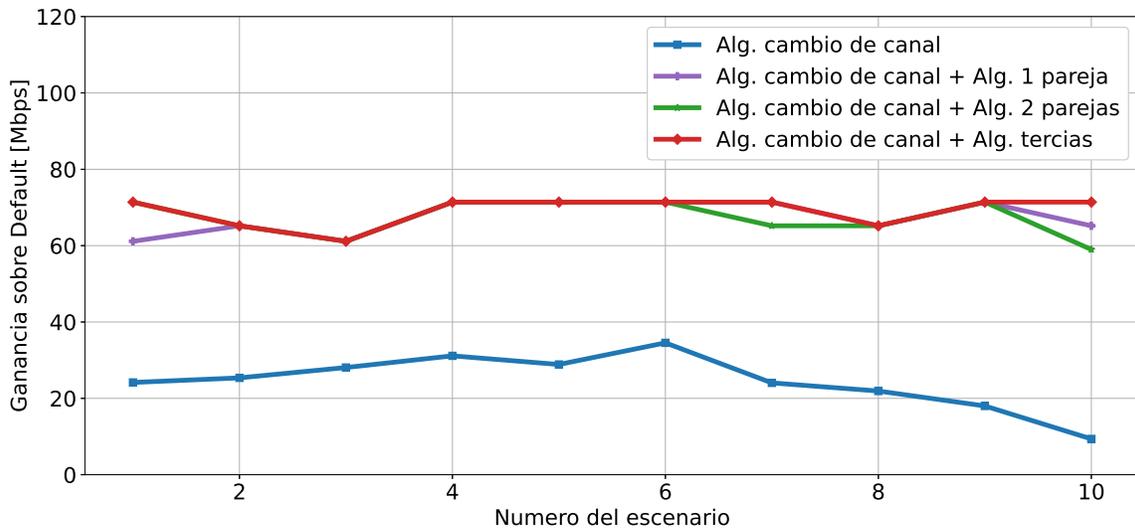
(a) Resultados de *throughput* absoluto(b) Resultados de diferencias de *throughput* con respecto de *default*(c) Resultados de diferencias de *throughput* con respecto del algoritmo de cambio de canal

Figura 5.5: Resultados del experimento de 15 AP.

Discussion

En el presente trabajo de tesis se desarrolló un primer algoritmo que realiza una asignación de canales en redes bajo el estándar IEEE 802.11. Posteriormente se desarrollaron tres algoritmos que modifican los parámetros de potencia de transmisión y umbral de sensado para asignar configuraciones que mejoran el rendimiento de cada AP. Para medir esta mejora, se utilizaron diversas métricas del rendimiento del canal inalámbrico.

El algoritmo de selección de canal en general mostró muy buenos resultados. Sin embargo, la ganancia en *throughput* depende mucho de la densidad de AP en el escenario. En los extremos, para casos muy densos o muy poco densos el algoritmo de selección de canal mostró poca ganancia comparada con el algoritmo *default*. En escenarios muy densos no importa el canal de operación todos los AP interfieren entre ellos, y el orden de transmisión entre los nodos en el mismo canal es del tipo *round-robin*. En escenarios muy poco densos no importa el canal asignado, no hay otro nodo alrededor con el cual se pueda interferir. Sin embargo, existe una banda de densidades de AP (distancia promedio entre los AP) que muestra el potencial del algoritmo propuesto para incrementar el desempeño de los nodos de la red.

Un resultado significativo obtenido durante los experimentos es que modificar la potencia de transmisión en los AP puede mejorar su rendimiento (*throughput*). En ocasiones, reducir la potencia de transmisión logra que dos AP cercanos transmitan de manera simultánea. En otros casos, existen situaciones donde tener una potencia de transmisión alta no es perjudicial, por ejemplo, en escenarios donde la separación entre los AP es lo suficientemente grande para no generar interferencias con otros AP. Un comportamiento similar ocurre con el umbral de sensado. Por ejemplo, para escenarios densos, un AP puede reducir la cantidad de nodos que sensa incrementando su umbral de sensado, mejorando su desempeño.

Durante el desarrollo de los experimentos se pudo apreciar que los algoritmos de una-pareja, dos-parejas y tercias tienen ganancias muy superiores al algoritmo *default* y superiores al algoritmo de asignación de canales. Por otro lado, se observó que dichos algoritmos tienen un desempeño similar, e incluso en algunos casos el algoritmo de una pareja resulta superior a los otros dos algoritmos. Igualmente, se pudo comprobar que el desempeño de estos tres algoritmos es cercano al mejor desempeño que solo se podría obtener por fuerza bruta. Lo anterior da lugar a la mayor contribución de esta tesis que es la de mostrar que un AP solo requiere considerar a sus vecinos más cercanos para elegir su configuración de operación, y puede de esta manera ignorar al resto de los nodos. Lo anterior reduce de manera muy significativa el espacio de búsqueda y el tiempo de convergencia comparado con otros algoritmos que consideran la totalidad de los nodos.

Es importante mencionar que debido a la naturaleza del problema mencionado en este trabajo y en otros citados en el estado del arte, estos algoritmos propuestos logran encontrar una solución aproximada.

Capítulo 6

Conclusiones

Los algoritmos desarrollados en este trabajo mejoran el rendimiento de redes WLAN que operan bajo el protocolo IEEE 802.11. Por un lado, el algoritmo de selección de canal hace uso de los canales ortogonales para separar nodos con el mismo canal la mayor distancia posible. Por otro lado, los algoritmos de una-pareja, dos-parejas y tercias encuentran a mejor configuración de potencia de transmisión y umbral de sensado para incrementar todavía más el desempeño de la red. Todos estos algoritmos tienen la propiedad que solo consideran un subconjunto de los nodos en la red (nodos vecinos), lo cual lleva a que estos algoritmos logren soluciones aproximadas a la solución óptima (usando fuerza bruta).

La hipótesis presentada en la sección 1.2:

“Para un AP, el impacto de la configuración que elijan sus vecinos disminuye con la distancia. Un subconjunto del espacio de búsqueda que considere únicamente a los vecinos más cercanos puede entonces contener al menos una solución cercana a la óptima global.”

De acuerdo con la figura 5.2 que corresponde al algoritmo de cambio de canal, los valores de *throughput* obtenidos con este algoritmo son muy superiores en comparación con la asignación estándar de canales en los AP (*configuración Default*). Por otro lado, la figura 5.3b muestra que los algoritmos de una y dos parejas, así como el de tercias, logran un desempeño superior a lo obtenido por el algoritmo de cambio de canal. Estos resultados, sin embargo, están condicionados por la distancia promedio entre los AP en cada escenario. En general, se pudo observar que los algoritmos propuestos logran ganancias solo para un cierto intervalo de distancia promedio entre AP. Todos estos resultados nos permiten asegurar que algoritmos que consideren únicamente a los vecinos más cercanos tienen el potencial de aumentar el rendimiento de la red. Finalmente es posible decir que esta hipótesis es verdadera.

Un resultado muy relevante de este trabajo fue encontrar que el algoritmo de una pareja logra el mejor desempeño de los tres algoritmos propuestos. Este resultado es inesperado, pues generalmente se considera que cualquier algoritmo que tenga más información de entrada a su disposición presentaría un mejor desempeño. En nuestro caso este resultado indica que, en sistemas donde existe una alta dependencia entre los nodos (en nuestro caso interferencia), es mejor optimizar la configuración de un nodo considerando solo a su vecino más cercano. Por otro lado, lo anterior resulta en un algoritmo extremadamente simple y robusto, más aún si se considera que el desempeño del algoritmo de una-pareja es cercano al valor óptimo que se obtendría por fuerza bruta considerando todos los nodos.

Trabajo futuro

Como una perspectiva de investigación a futuro, se pueden implementar los algoritmos propuestos en dispositivos SDR (*Software Defined Radio*) para evaluar su rendimiento en términos de la ganancia

en *throughput* sobre distintos escenarios y diferentes entornos como espacios abiertos, oficinas, departamentos, sobre distintas distancias promedio entre los AP y densidades de los mismos. También se podrían añadir nuevas características a los algoritmos propuestos, como por ejemplo una potencia adaptativa de acuerdo a la distancia entre el AP y su cliente para mejorar la velocidad de transmisión y calidad de la señal.

Referencias

- [1] X. Yu, P. Navaratnam, and K. Moessner, “Resource reservation schemes for iee 802.11-based wireless networks: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1042–1061, 2012.
- [2] A. J. Trappey, C. V. Trappey, U. H. Govindarajan, A. C. Chuang, and J. J. Sun, “A review of essential standards and patent landscapes for the internet of things: A key enabler for industry 4.0,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 33, pp. 208–229, 2017.
- [3] M. D. P. E. A. EXTERIORES, “Propagation model in outdoor environments for wireless systems operating at the frequency band of 2.4 ghz,” *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2008.
- [4] T. S. Rappaport *et al.*, *Wireless communications: principles and practice*, vol. 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [5] C. Correa, R. Godoy, W. Grote, and M. Orellana, “Evaluación de enlaces inalámbricos urbanos usando protocolo iee 802.11 b,” *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, vol. 13, no. 3, pp. 38–44, 2005.
- [6] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.
- [7] S. Banerji and R. S. Chowdhury, “On iee 802.11: wireless lan technology,” *arXiv preprint arXiv:1307.2661*, 2013.
- [8] M. Schwartz, *Mobile wireless communications*, vol. 25. IET, 2005.
- [9] J. Herzen, R. Merz, and P. Thiran, “Distributed spectrum assignment for home wlans,” in *2013 Proceedings Ieee Infocom*, pp. 1573–1581, IEEE, 2013.
- [10] J. G. Lim, C. T. Chou, and S. Jha, “Socially conscious channel selection in 802.11 wlans for coexistence in a non-cooperative environment,” in *Proceedings of the 12th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 155–162, 2009.
- [11] A. Mishra, V. Shrivastava, D. Agrawal, S. Banerjee, and S. Ganguly, “Distributed channel management in uncoordinated wireless environments,” in *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 170–181, 2006.
- [12] S. Chiochan, E. Hossain, and J. Diamond, “Channel assignment schemes for infrastructure-based 802.11 wlans: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 1, pp. 124–136, 2010.

- [13] M. Achanta, "Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points," Apr. 6 2006. US Patent App. 10/959,446.
- [14] J. M. Gimenez-Guzman, I. Marsa-Maestre, D. Orden, E. de la Hoz, and T. Ito, "On the Goodness of Using Orthogonal Channels in WLAN IEEE 802.11 in Realistic Scenarios," *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 1–11, 2018.
- [15] D. Leith, P. Clifford, V. Badarla, and D. Malone, "WLAN channel selection without communication," *Computer Networks*, vol. 56, no. 4, pp. 1424–1441, 2019.
- [16] P. Dely, A. Kessler, L. Chow, N. Bambos, N. Bayero, H. Einsiedler, and C. Peylo, "Best-ap: Non-intrusive estimation of available bandwidth and its application for dynamic access point selection," *Computer Communications*, vol. 39, pp. 78–91, 2014.
- [17] F. Maturi, F. Gringoli, and R. L. Cigno, "A dynamic and autonomous channel selection strategy for interference avoidance in 802.11," in *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pp. 1–8, IEEE, 2017.
- [18] X. Yue, C.-F. Wong, and S.-H. G. Chan, "Cacao: Distributed client-assisted channel assignment optimization for uncoordinated wlans," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 1433–1440, 2011.
- [19] M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera, G. Smith, and D. Camps, "Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for ieee 802.11 ax," in *2015 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, pp. 1060–1065, IEEE, 2015.
- [20] F. Wilhelmi, C. Cano, G. Neu, B. Bellalta, A. Jonsson, and S. Barrachina-Muñoz, "Collaborative spatial reuse in wireless networks via selfish multi-armed bandits," *Ad Hoc Networks*, vol. 88, pp. 129–141, 2019.
- [21] O. Avner and S. Mannor, "Learning to coordinate without communication in multi-user multi-armed bandit problems," *arXiv preprint arXiv:1504.08167*, 2015.
- [22] S. Maghsudi and S. Stańczak, "Joint channel selection and power control in infrastructureless wireless networks: A multiplayer multiarmed bandit framework," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 10, pp. 4565–4578, 2014.
- [23] R. Jain, A. Duresi, and G. Babic, "Throughput fairness index: An explanation," in *ATM Forum contribution*, vol. 99, 1999.
- [24] S. Robitzsch, L. Murphy, and J. Fitzpatrick, "An analysis of the received signal strength accuracy in 802.11 a networks using atheros chipsets: A solution towards self configuration," in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1429–1434, IEEE, 2011.
- [25] G. Bianchi, "Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [26] S. Barrachina-Munoz, F. Wilhelmi, I. Selinis, and B. Bellalta, "Komondor: A wireless network simulator for next-generation high-density wlans," in *2019 Wireless Days (WD)*, pp. 1–8, IEEE, 2019.
- [27] R. Hernández-Sampieri and C. P. M. Torres, *Metodología de la investigación*, vol. 4. McGraw-Hill Interamericana México eD. F DF, 2018.