

GRADO EN INGENIERÍA TELEMÁTICA



Trabajo Fin de Grado

MECANISMOS DE ASIGNACIÓN DE CANALES EN REDES
IEEE 802.11

ESCUELA POLITECNICA

Autor: David Crespo Sen

Tutor/es: José Manuel Giménez Guzmán

2019

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Telemática

Trabajo Fin de Grado

MECANISMOS DE ASIGNACIÓN DE CANALES EN REDES
IEEE 802.11

Autor: David Crespo Sen

Tutor/es: José Manuel Giménez Guzmán

TRIBUNAL:

Presidente: Juan Antonio Rodrigo Yanes

Vocal 1º: Iván Marsá Maestre

Vocal 2º: José Manuel Giménez Guzmán

FECHA: 30 de Julio de 2019

“La clave del éxito es la perseverancia”

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer de corazón a toda mi familia, en especial a mis padres Jesús y Celia y a mi hermano Jorge, por estar a mi lado en todo momento, tanto en los momentos buenos como en los no tan buenos, ya que sin su apoyo todo habría sido más complicado.

En segundo lugar, quiero dar las gracias también a mis amigos y amigas, y todos los compañeros que he conocido durante la carrera, porque han sabido apoyarme y ayudarme conseguir dar todo de mi.

Por último, pero no menos importante, agradecer a todos y cada uno de los profesores que me han impartido clase, ya que han aportado cada uno al menos un granito de arena para construir la base del aprendizaje obtenido, en especial a los profesores de telemática, que es con los que tuve un trato más cercano y en particular José Manuel.

Índice de contenidos

ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
RESUMEN	13
PALABRAS CLAVE	13
ABSTRACT	14
KEYWORDS	14
INTRODUCCIÓN	15
LAS REDES INALÁMBRICAS IEEE 802.11	18
Wi-Fi.....	20
ASIGNACIÓN DE CANALES	22
ALGORITMOS DE ASIGNACIÓN DE CANALES EMPLEADOS	30
RANDOM	30
LCCS (<i>LEAST CONGESTED CHANNEL SCAN</i>).....	30
SA (<i>SIMULATED ANNEALING</i> , TEMPLE SIMULADO).....	31
KCKC	34
<i>Propuesta de esquema de selección de canal distribuido</i>	34
<i>Implementación del esquema de selección de canal distribuido</i>	38
AIIM	39
<i>Esquema de asignación de canales controlado por la red</i>	39
<i>Implementación del esquema de asignación de canales controlado por la red</i>	41
HZNA	44
<i>Algoritmo de combinación de vértices (VMA) propuesto</i>	45
<i>Implementación del algoritmo de combinación de vértices (VMA)</i>	46
MEJORA DEL ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE CANALES AIIM	51
EXPERIMENTOS Y RESULTADOS.....	53
HERRAMIENTAS UTILIZADAS	53
<i>Python</i>	54
<i>NumPy (Numeric Python)</i>	54
<i>NetworkX</i>	54
<i>Anaconda Navigator</i>	55
<i>Spyder (Scientific Python Development Environment)</i>	56
MODELADO MEDIANTE GRAFOS MULTICAPA	57
ESCENARIOS EMPLEADOS	61
RESULTADOS	67
<i>Definición de los tipos de resultados obtenidos</i>	67
<i>Resultados numéricos obtenidos por técnica para todos los grafos</i>	68
<i>Conclusiones obtenidas</i>	71
<i>Resultados numéricos obtenidos en un grafo por todas las técnicas</i>	72
CONCLUSIONES FINALES.....	80
PLIEGO DE CONDICIONES	82
CONDICIONES DE MATERIAL Y EQUIPOS	82
CONDICIONES DE EJECUCIÓN	83
PRESUPUESTO.....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

Índice de tablas

TABLA 1: ESTÁNDARES WI-FI.....	21
TABLA 2: CANALES EN ESPECTRO DE 2,4 GHZ.....	22
TABLA 3: INTERFERENCIA COCANAL EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE CANALES.....	59
TABLA 4: RESULTADOS RANDOM 11 CANALES	68
TABLA 5: RESULTADOS RANDOM 3 CANALES	68
TABLA 6: RESULTADOS SA 11 CANALES	68
TABLA 7: RESULTADOS SA 3 CANALES	68
TABLA 8: RESULTADOS KCKC 11 CANALES	69
TABLA 9: RESULTADOS KCKC 3 CANALES	69
TABLA 10: RESULTADOS HZNA 11 CANALES.....	69
TABLA 11: RESULTADOS HZNA 3 CANALES.....	69
TABLA 12: RESULTADOS AIIM 11 CANALES.....	69
TABLA 13: RESULTADOS AIIM 3 CANALES.....	69
TABLA 14: RESULTADOS MEJORA AIIM 11 CANALES	70
TABLA 15: RESULTADOS MEJORA AIIM 3 CANALES	70
TABLA 16: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.25-1	72
TABLA 17: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.25-1	72
TABLA 18: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-2	73
TABLA 19: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.25-2	73
TABLA 20: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.25-3	73
TABLA 21: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.25-3	73
TABLA 22: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-1.....	74
TABLA 23: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.5-1	74
TABLA 24: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-2.....	74
TABLA 25: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.5-2	74
TABLA 26: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-3.....	75
TABLA 27: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.5-3	75
TABLA 28: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.75-1.....	75
TABLA 29: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.75-1	75
TABLA 30: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.75-2.....	76
TABLA 31: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.75-2	76
TABLA 32: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.75-3.....	76
TABLA 33: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.75-3	76
TABLA 34: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-1-1	77
TABLA 35: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-1-1	77
TABLA 36: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-1-2	77
TABLA 37: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-1-2	77
TABLA 38: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-1-3	78
TABLA 39: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-1-3	78
TABLA 40: TAREAS REALIZADAS Y HORAS EMPLEADAS	85
TABLA 41: PRESUPUESTO MATERIAL HARDWARE	86
TABLA 42: PRESUPUESTO MATERIAL SOFTWARE.....	86
TABLA 43: PRESUPUESTO MATERIAL DE OFICINA.....	86
TABLA 44: PRESUPUESTO MANO DE OBRA.....	86
TABLA 45: PRESUPUESTO TOTAL SIN IVA.....	86
TABLA 46: PRESUPUESTO TOTAL CON IVA	86

Índice de figuras

FIGURA 1: ESPECTRO DE FRECUENCIAS BANDA 2,4 GHZ.....	15
FIGURA 2: INFRAESTRUCTURA DE RED INALÁMBRICA.....	18
FIGURA 3: ESTÁNDARES IEEE WxAN.....	19
FIGURA 4: LOGOTIPO WI-FI.....	20
FIGURA 5: ESPECTRO DE FRECUENCIAS BANDA 2,4 GHZ.....	22
FIGURA 6: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EN REDES CENTRALIZADAS.....	26
FIGURA 7: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EN REDES NO COORDINADAS.....	28
FIGURA 8: ESQUEMA GENERAL SA.....	31
FIGURA 9: ESQUEMA MECANISMO DE DECISIÓN SA.....	32
FIGURA 10: ESQUEMA VOTACIÓN DEL TEMPLADO POR EL AGENTE.....	33
FIGURA 11: REPRESENTACIÓN DE TRAMAS BALIZA.....	35
FIGURA 12: ESQUEMA DE INTERCAMBIO DE MENSAJES.....	35
FIGURA 13: ESCENARIO EJEMPLO PARA TÉCNICA DE KCKC.....	37
FIGURA 14: TRAMA 1 ASIGNACIÓN KCKC.....	37
FIGURA 15: TRAMA 2 ASIGNACIÓN KCKC.....	37
FIGURA 16: ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN KCKC.....	38
FIGURA 17: ESQUEMA GENERAL AIIM.....	40
FIGURA 18: ESQUEMA PRIMERA PARTE AIIM.....	41
FIGURA 19: ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN PRIMERA PARTE AIIM.....	41
FIGURA 20: ESQUEMA SEGUNDA PARTE AIIM.....	42
FIGURA 21: ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN SEGUNDA PARTE AIIM.....	42
FIGURA 22: ESQUEMA COMPLETO DE IMPLEMENTACIÓN AIIM.....	43
FIGURA 23: ESQUEMA DE UN GRAFO EJEMPLO.....	44
FIGURA 24: ESQUEMA GENERAL HZNA.....	45
FIGURA 25: ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN HZNA 3 CANALES.....	46
FIGURA 26: ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN HZNA 11 CANALES.....	47
FIGURA 27: GRAFO EJEMPLO HZNA INICIAL.....	47
FIGURA 28: GRAFO EJEMPLO HZNA PRIMER PASO.....	48
FIGURA 29: GRAFO EJEMPLO HZNA SEGUNDO PASO.....	48
FIGURA 30: GRAFO EJEMPLO HZNA CUARTO PASO.....	48
FIGURA 31: GRAFO EJEMPLO HZNA CUARTO PASO.....	49
FIGURA 32: GRAFO EJEMPLO HZNA QUINTO PASO.....	49
FIGURA 33: GRAFO EJEMPLO HZNA SEXTO PASO.....	49
FIGURA 34: GRAFO EJEMPLO HZNA SÉPTIMO PASO.....	49
FIGURA 35: GRAFO EJEMPLO HZNA OCTAVO PASO.....	50
FIGURA 36: GRAFO EJEMPLO HZNA NOVENO PASO.....	50
FIGURA 37: GRAFO EJEMPLO HZNA DÉCIMO PASO.....	50
FIGURA 38: GRAFO EJEMPLO APS Y CLIENTES AIIM.....	51
FIGURA 39: GRAFO EJEMPLO APS Y CLIENTES AIIM CON INTERFERENCIAS ENTRE APS.....	51
FIGURA 40: GRAFO EJEMPLO APS Y CLIENTES AIIM CON INTERFERENCIAS CLUSTER.....	52
FIGURA 41: LOGOS HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	53
FIGURA 42: GRAFO EJEMPLO UBICACIÓN DE APS.....	57
FIGURA 43: EJEMPLO DE GRAFO COLOREADO.....	57
FIGURA 44: EJEMPLO DE GRAFO DE CONECTIVIDAD.....	58
FIGURA 45: GRAFO DE INTERFERENCIAS.....	58
FIGURA 46: REPRESENTACIÓN DE LA UTILIDAD DEL DISPOSITIVO EN FUNCIÓN DEL SIR (dB).....	60
FIGURA 47: ESQUEMA DE LA EPS CON UBICACIÓN DE APS Y REPRESENTACIÓN DE LA SEÑAL.....	61
FIGURA 48: GRAFO G ESCENARIO 1.....	62
FIGURA 49: GRAFO I ESCENARIO 1.....	62
FIGURA 50: GRAFO G ESCENARIO 2.....	62
FIGURA 51: GRAFO I ESCENARIO 2.....	62
FIGURA 52: GRAFO G ESCENARIO 3.....	62
FIGURA 53: GRAFO I ESCENARIO 3.....	62
FIGURA 54: GRAFO G ESCENARIO 4.....	63
FIGURA 55: GRAFO I ESCENARIO 4.....	63
FIGURA 56: GRAFO G ESCENARIO 5.....	63
FIGURA 57: GRAFO I ESCENARIO 5.....	63

FIGURA 58: GRAFO G ESCENARIO 6	63
FIGURA 59: GRAFO I ESCENARIO 6	63
FIGURA 60: GRAFO G ESCENARIO 7	64
FIGURA 61: GRAFO I ESCENARIO 7	64
FIGURA 62: GRAFO G ESCENARIO 8	64
FIGURA 63: GRAFO I ESCENARIO 8	64
FIGURA 64: GRAFO G ESCENARIO 9	64
FIGURA 65: GRAFO I ESCENARIO 9	64
FIGURA 66: GRAFO G ESCENARIO 10	65
FIGURA 67: GRAFO I ESCENARIO 10	65
FIGURA 68: GRAFO G ESCENARIO 11	65
FIGURA 69: GRAFO I ESCENARIO 11	65
FIGURA 70: GRAFO G ESCENARIO 12	65
FIGURA 71: GRAFO I ESCENARIO 12	65
FIGURA 72: REPRESENTACIÓN DE LA UTILIDAD DEL DISPOSITIVO EN FUNCIÓN DEL SIR (dB)	66
FIGURA 73: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.25-1	72
FIGURA 74: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.25-1	72
FIGURA 75: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.25-2	73
FIGURA 76: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.25-2	73
FIGURA 77: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.25-3	73
FIGURA 78: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.25-3	73
FIGURA 79: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-1	74
FIGURA 80: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.5-1	74
FIGURA 81: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-2	74
FIGURA 82: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.5-2	74
FIGURA 83: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.5-3	75
FIGURA 84: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.5-3	75
FIGURA 85: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.75-1	75
FIGURA 86: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.75-1	75
FIGURA 87: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.75-2	76
FIGURA 88: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.75-2	76
FIGURA 89: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-0.75-3	76
FIGURA 90: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-0.75-3	76
FIGURA 91: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-1-1	77
FIGURA 92: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-1-1	77
FIGURA 93: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-1-2	77
FIGURA 94: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-1-2	77
FIGURA 95: RESULTADOS 11 CANALES GRAFO EPS-1-3	78
FIGURA 96: RESULTADOS 3 CANALES GRAFO EPS-1-3	78
FIGURA 97: DIAGRAMA DE GANTT DEL PROYECTO	84

Resumen

El principal objetivo del presente TFG es implementar, evaluar y comprobar algunas de las técnicas más recientes propuestas en la literatura científica para la asignación de canales en redes Wi-Fi. Además, en este trabajo también se propone la mejora de alguna de las técnicas. Estas técnicas tratan de adaptar el problema de la asignación de canales a otro de coloreado del grafo, por lo que se trabajará con grafos multicapa y el paquete NetworkX de Python, que va a ser el lenguaje de programación empleado para la resolución.

Palabras clave

Redes Wi-Fi, asignación de canales, coloreado de grafos.

Abstract

The main objective of this TFG is to apply, evaluate and check some of the most recent techniques proposed in the scientific literature for the channel allocation in Wi-Fi networks. In addition, in this work also proposes the improvement some of the techniques. These techniques try to adapt the problem of channel allocation to another one of the graph colouring, so we will work with multilayer graphs and the Python package NetworkX, which will be the code language to use in the implementation.

Keywords

Wi-Fi networks, channel assignment, graph colouring.

Introducción

Las redes inalámbricas locales (WLAN, *Wireless Local Area Networks*) fueron propuestas entre otros motivos, para dotar de mayor flexibilidad y movilidad a los usuarios finales. Dentro de estas redes destacan las que operan según la familia de estándares descrita en IEEE 802.11, también llamadas redes Wi-Fi. Estas redes Wi-Fi operan habitualmente en la banda de frecuencias libre de 2,4 GHz. Esta banda de frecuencias está compuesta por 14 canales, de los cuales el canal 14 es operable únicamente en Japón y el resto de los países operan con 11 ó 13 canales. Sin embargo, al tratarse de una banda libre han aparecido multitud de tecnologías que operan también en esta banda, como son Bluetooth, o Zigbee. Al convivir tantas tecnologías en la misma banda de frecuencias, se crea un conflicto de ancho de banda.

La tecnología Wi-Fi también permite operar en la banda de frecuencias de 5 GHz, esta banda está compuesta por 25 canales y es relativamente nueva. Las ventajas respecto a la de 2,4 GHz son que hay menos interferencias y tiene una mayor velocidad, pero por el contrario, tiene un menor alcance y un obstáculo intermedio genera un gran impacto perdiendo mucha señal.

Los routers modernos emiten en ambas bandas de frecuencia, por lo que podemos elegir a cuál conectarnos. El uso óptimo de cada una de las bandas de frecuencia es por tanto según las necesidades, esto es, en función de si lo importante es la velocidad o la cobertura, en el primer caso elegiríamos la banda de 5 GHz mientras que en el segundo la de 2,4 GHz. Los routers más actuales incorporan además la funcionalidad de Wi-Fi inteligente, que se encarga de elegir automáticamente en qué banda conectar los dispositivos en todo momento pudiendo intercambiar la conexión en cualquier instante.

Por tanto, una de las posibles soluciones que se han tomado es que el Wi-Fi opere tanto en la banda de 2,4 GHz como en la de 5 GHz por las ventajas comentadas anteriormente. Otra solución que se ha propuesto para obtener un mayor rendimiento de la red en la banda de 2,4 GHz es una asignación óptima de canales. Este problema de asignación de canales lo vamos a adaptar a un problema de coloreado del grafo. Esta segunda opción es interesante porque libramos los problemas de la banda de 5 GHz y a su vez, minimizamos las interferencias, además de que permitimos que algunos dispositivos antiguos puedan conectarse a una red Wi-Fi ya que por el hecho de ser antiguos no detectan la banda de 5 GHz. Por lo que en este trabajo vamos a tratar de conseguir el mayor rendimiento a las redes Wi-Fi que operan en la banda de 2,4 GHz haciendo una asignación de canales óptima.

Lo primero que vamos a ver es la forma del espectro de esta banda de frecuencias con las frecuencias correspondientes a cada canal. La forma que tiene es la siguiente:

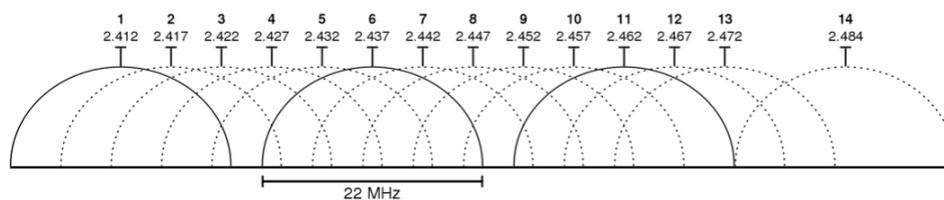


Figura 1: Espectro de frecuencias banda 2,4 GHz

En este esquema podemos ver las frecuencias centrales de cada canal y que todos los canales tienen un ancho de banda de 22 MHz. Otra cosa que vemos son los tres canales que no se superponen, estos vienen resaltaros en negrita y son los canales 1, 6 y 11 que están separados por 3 MHz. Esto es algo interesante para tratar el problema de asignación de canales, ya que si estos canales no están solapados evitamos la interferencia cocanal y, por tanto, conseguimos un mayor rendimiento de la red.

El recurso que utilizaremos para la mejora del rendimiento de estas redes WLAN va a ser la asignación óptima de los canales a los puntos de acceso (AP, *Access Points*), es decir, intentar mediante esta asignación que se reduzca la interferencia cocanal y la interferencia causada por otros APs con el mismo canal asociado, ya que una asignación inalámbrica no puede lograr estas cosas. Para tratar mejor este problema vamos a crear unos grafos multicapa (grafos de interferencia y grafos de conexión) que representan la red Wi-Fi que vamos a optimizar y trataremos este problema de asignación de canales como un problema de coloreado del grafo. Estos grafos se componen de vértices (APs y clientes) y aristas (que representan la relación entre los elementos de la red).

El problema de coloreado del grafo trata de representar cada canal con un color y asociar estos colores a los vértices del grafo, para ello tenemos en cuenta entre otras cosas los vértices que son vecinos o no lo son (están unidos por una arista o no hay arista alguna que los mantenga conectados). Esto es para que, en la medida de lo posible, no tener el mismo canal asociado ya que esto crearía interferencias entre ellos y, por tanto, empeoraría el rendimiento de la red. Principalmente trabajaremos con 3 colores o con 11 colores, que representan a los canales no solapados y a los canales totales respectivamente (aunque como ya vimos en algunos sitios se emplean 13 ó 14 canales, por lo que tendríamos el mismo número de colores).

La primera parte de este trabajo será una lectura a fondo del artículo de Chieochan et al. [12], ya que engloba multitud de técnicas de asignación de canales y proporciona información general sobre este tema. La segunda parte va a consistir en la lectura de algunos artículos concretos en los que únicamente se propone un algoritmo de manera más detallada, para así poder implementar algunas de las técnicas. En este caso han sido la propuesta por Kwon et al. [11], la de Abeysekera et al. [10] y por último la propuesta por Handrizal et al. [9]. A estas técnicas se las denominará, de acuerdo al nombre de sus autores, KCKC, AIIM y HZNA, respectivamente. Pero la implementación de estas técnicas no tendría sentido sin realizar las pruebas de rendimiento con algún algoritmo que establezca límites de rendimiento tanto superiores como inferiores, esto lo hacemos para poder obtener una comparación real entre las distintas técnicas, esta comparación y validación de los resultados sería la tercera y última parte del trabajo.

Una breve descripción de los algoritmos que se han implementado es la siguiente:

- **KCKC [11]:** Esta técnica consiste en conseguir información sobre los APs y clientes interferentes por medio de las tramas de control, gracias a esto consigue conocer la congestión de cada canal, la cual será la base para elegir el canal menos congestionado, es decir, el AP escoge el canal con menos interferencias.
- **AIIM [10]:** Esta técnica consiste en realizar una asignación de canales inicial de forma aleatoria e ir haciendo distintas asignaciones al AP de menor utilidad hasta conseguir maximizar la utilidad del grafo. Esto se repite un número determinado de veces o hasta que la utilidad del grafo sea máxima, esto es, la utilidad igual a uno.
- **HZNA [9]:** Esta técnica consiste en intentar asignar canales distintos a los APs vecinos para así evitar gran parte de las interferencias. Lo ideal sería que en un mismo canal no coincidiera ningún AP vecino de otro. Este algoritmo es ideal para emplear el menor número de canales posibles teniendo todos los canales disponibles.

Para el análisis de las diferentes técnicas se ha empleado el mismo escenario, el de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares y las mismas condiciones de ocupación para poder realizar así una comparación justa. Por cada ocupación de la escuela vamos a emplear tres escenarios distintos, en los que los grafos contienen el mismo número de APs y clientes, pero estos clientes están distribuidos de diferente forma en cada escenario.

Los factores que se han empleado en la comparación son los resultados obtenidos con la función de utilidad y su intervalo de confianza. Esta función tiene en cuenta un modelo concreto de propagación y representan la utilidad obtenida gracias a esta función se consiguen mediante el cálculo de la SIR (Relación Señal a Interferencia), que varía si se calcula desde el AP o desde el cliente, además define unos valores máximo y mínimo del SIR a partir de los cuales la utilidad es máxima y mínima respectivamente. La utilidad del grafo es la suma de las utilidades de los APs mientras que la utilidad del *cluster* es la suma de las utilidades de todos sus elementos, es decir, clientes y APs.

Para obtener las conclusiones finales sobre si los algoritmos son válidos o no y cuáles son mejores que otros se han comparado con dos algoritmos, estos son, *random* y SA. Una breve descripción de estos algoritmos empleados para la comparación es la siguiente:

- **Random:** La técnica *random* es la primera que vamos a implementar, ya que es la que sirve como comparación y referencia y la más sencilla de realizar. Esta técnica consiste en la asignar a cada AP un canal al azar.
- **SA (*Simulated Annealing*):** La técnica SA se basa en el templado de una forja, consiste en que se proponen asignaciones de canales propuesta por el mediador que tienen que ser aceptado mutuamente por los agentes siempre que sea mejor que la actual, aunque va a depender también de una probabilidad que a su vez depende de la pérdida de utilidad y del parámetro conocido como temperatura de templado.

Los resultados obtenidos con el algoritmo Random los vamos a tomar como los límites inferiores de los resultados que se puedan conseguir en una asignación de canales, por lo que si los valores obtenidos con las técnicas implementadas son cercanos a estos, no será una buena asignación de canales, mientras que los resultados obtenidos con el algoritmo SA los vamos a tomar como los límites superiores de los resultados que se puedan conseguir en una asignación de canales, por lo que si los valores obtenidos con los algoritmos implementados son cercanos a estos valores, será una buena asignación de canales. Con estas condiciones que se han expuesto se obtendrán las conclusiones finales del trabajo basado en la asignación de canales óptima en redes Wi-Fi.

Las redes inalámbricas IEEE 802.11

Las redes Wi-Fi constituyen uno de los pilares básicos por los que los clientes se conectan a Internet. Estas redes inalámbricas permiten la conexión de varios dispositivos como teléfonos móviles, ordenadores portátiles, *tablets*, *smart watch*, ... de una forma heterogénea, esto es, en cualquier momento desde cualquier lugar, para ello, tenemos que tener en cuenta que los terminales irán cambiando su punto de acceso a la red y, al no haber cables, el medio de propagación de las redes inalámbricas es el espectro radioeléctrico. Los elementos básicos que componen una red inalámbrica son:

- **Hosts inalámbricos:** Ejecutan aplicaciones y pueden tener o no movilidad.
- **Estaciones base:** También llamadas puntos de acceso (AP) que son los encargados de reenviar paquetes entre la red cableada y la inalámbrica dentro de su área de cobertura y normalmente están conectados a la red cableada.
- **Enlace inalámbrico:** Posee un protocolo de acceso múltiple al medio y conecta los hosts con su punto de acceso.

Un ejemplo de esquema de una red inalámbrica podría ser el siguiente:

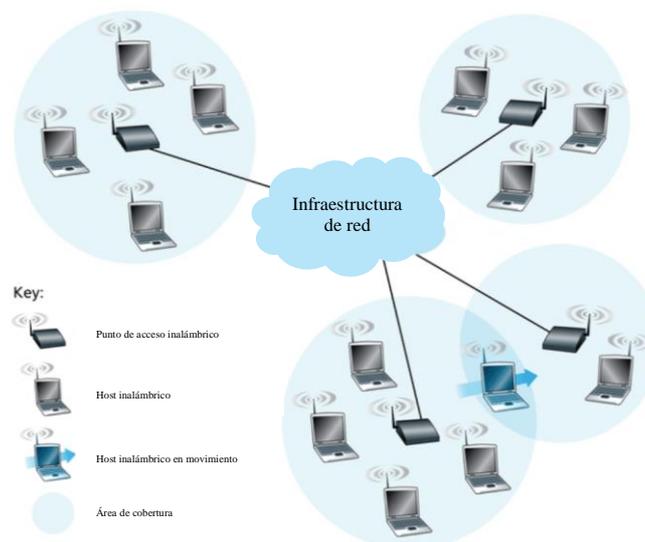


Figura 2: Infraestructura de red inalámbrica

Tenemos varias tecnologías inalámbricas en función de su área de cobertura (WxAN) como:

- **WRAN (Wireless Regional Area Network):** Las redes inalámbricas de área regional se utilizan para dar servicios de banda ancha a zonas con dificultad para ofrecer este servicio.
- **WWAN (Wireless Wide Area Network):** Las redes inalámbricas de área extensa son las que albergan mayor área de cobertura dentro de las redes inalámbricas. Este tipo de redes son las que dan soporte a la telefonía utilizando tecnologías como UMTS, GPRS, EDGE, 3G, ... para transferencia de datos.

- **WMAN (Wireless Metropolitan Area Network):** Las redes inalámbricas de área metropolitana tienen un gran alcance y son muy útiles para las compañías de telecomunicaciones. Un ejemplo de este tipo de redes inalámbricas es WiMAX, que cumple con los estándares IEEE 802.16.
- **WLAN (Wireless Local Area Network):** Las redes inalámbricas de área local son sistemas de comunicaciones inalámbricas para minimizar los sistemas cableados. Utiliza puntos de acceso (AP) para conectar los dispositivos inalámbricamente. Un ejemplo de redes inalámbricas de este tipo es Wi-Fi, basado en el estándar IEEE 802.11.
- **WPAN (Wireless Personal Area Network):** Las redes inalámbricas de área personal son redes que nos permiten conectar dispositivos personales con sus periféricos permitiendo una comunicación directa a corta distancia (ya que son redes de corto alcance) entre los dispositivos. Un ejemplo de redes inalámbricas de este tipo es el Bluetooth, que cumple con el estándar IEEE 802.15.

Un gráfico del posicionamiento de los Estándares IEEE para la tecnología inalámbrica es el siguiente:

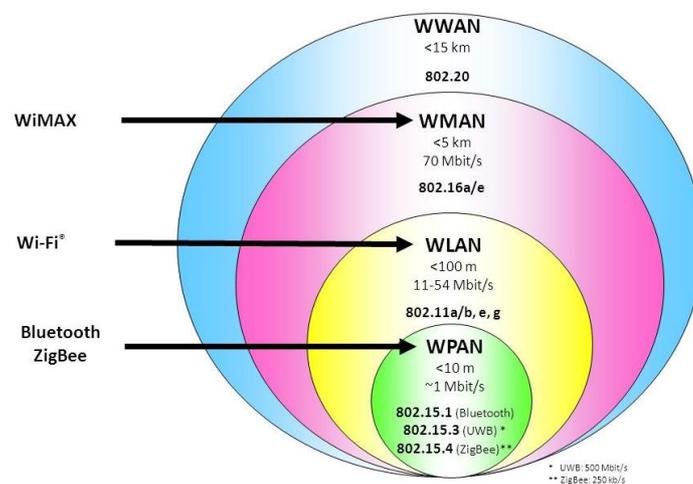


Figura 3: Estándares IEEE WxAN

Otra clasificación de las redes inalámbricas puede ser en función de si tienen o no una infraestructura:

- **Redes de infraestructura:** Poseen una infraestructura donde los APs interconectan toda la red inalámbrica, los dispositivos pueden realizar cambios de AP. Dentro este tipo de redes se pueden volver a clasificar en dos clases:
 - Solo un salto inalámbrico: Los hosts se conectan a una estación base que habitualmente está conectada a Internet.
 - Múltiples saltos inalámbricos: Los hosts necesitan varios saltos para alcanzar la estación base.
- **Redes ad hoc:** No poseen una infraestructura, los hosts transmiten a paquetes a otros hosts dentro de su área de cobertura y se organizan entre ellos para formar una red de forma que se encaminan paquetes entre nodos. Dentro de este tipo de redes se pueden volver a clasificar en dos clases:
 - Solo un salto inalámbrico: No hay estación base, como el caso de Bluetooth.
 - Múltiples saltos inalámbricos: No hay estación base y los nodos pueden tener que retransmitir a otros nodos antes de llegar al destino.

Wi-Fi

Este trabajo estará centrado en las redes Wi-Fi, pero... ¿Qué es el Wi-Fi? Wi-Fi es la abreviatura de *Wireless-Fidelity* (fidelidad inalámbrica), que es el nombre de la certificación otorgado por la *Wi-Fi Alliance*, anteriormente *WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance)*, que es un grupo que garantiza la compatibilidad entre dispositivos que utilizan el estándar 802.11. El mal uso del término Wi-Fi hace que se confunda el nombre del estándar con la certificación, ya que, en realidad, Wi-Fi es la forma comercial de llamar a las redes inalámbricas de área local (WLAN) que cumplen con el estándar IEEE 802.11. Esta certificación es la que permite a los dispositivos usar el siguiente logotipo:



Figura 4: Logotipo Wi-Fi

Actualmente, en el mundo de las telecomunicaciones, se han popularizado las redes inalámbricas. Aunque la tecnología ha evolucionado, la amplia demanda del espectro radioeléctrico unida a su escasez requiere hacer un uso eficiente del mismo. Inicialmente, la ordenación del espectro radioeléctrico no tenía en cuenta su escasez, porque únicamente fue pensada para la necesidad de coordinar internacionalmente la radiotelegrafía, pero al aparecer las nuevas tecnologías que se instauran en el mismo, cada vez se va notando más su escasez.

La carencia del espectro radioeléctrico es debida a varios factores que dificultan que se ofrezcan unos servicios telemáticos con ciertas garantías. Algunos factores que podemos destacar son:

- Cada vez existen más tecnologías que utilizan dicho espectro radioeléctrico, como pueden ser Wi-Fi, Bluetooth, infrarrojos, NFC, ..., todas estas tecnologías deben convivir en un mismo rango de frecuencias sin crear problemas unas con otras.
- Cada vez son más las personas que utilizan dispositivos con estas tecnologías, esto es, la mayoría de las personas tienen teléfono móvil, pero actualmente también es muy frecuente el uso de ordenadores portátiles, *tablets*, televisiones, manos libres, altavoces o auriculares bluetooth, ..., por lo que se necesita un mayor número de recursos.
- En caso de Internet, por ejemplo, los clientes cada vez demandan un mayor ancho de banda para una conexión más rápida y fluida.
- Los mecanismos de acceso a Internet inalámbrico están disponibles cada vez en un mayor sitio de lugares públicos como cafeterías, aeropuertos, etc...

Este último factor nos hace poner un mayor número de APs para poder mejorar la señal de la red Wi-Fi en la que conectarnos, pero a su vez, el aumento de la densidad de APs WLAN resalta los efectos negativos o las deficiencias de los estándares IEEE 802.11 originales.

Para solventar dicho problema de escasez, es necesario hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico. Algunas de las soluciones que se proponen son el uso de nuevas modulaciones más robustas para la transmisión, un modelo basado en mercado en el que se determinen las condiciones de utilización de los recursos, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), que aumenta la eficiencia espectral utilizando el dominio espacial) ... Sin embargo, en este trabajo lo que haremos será tratar de coordinar los elementos que forman las redes por medio de la implementación de algunas de las técnicas de asignación de canales, mejorando así el rendimiento de las redes inalámbricas.

Podemos tener tres enfoques en los que se puede basar el modelo del espectro radioeléctrico en la mayor parte de las tecnologías inalámbricas, estos son:

- **Propietario:** Cada proveedor de servicios posee un determinado espectro para su uso exclusivo. Las redes de telefonía, entre otras, habitualmente se basan en ello.
- **No propietario:** El espectro utilizado es el que encontramos en las bandas de frecuencias libres, por ello conviven excesivas tecnologías y redes.
- **Híbrido:** Es una mezcla de los anteriores, esto es, unos dispositivos utilizan el espectro de forma propietaria y otros de forma no propietaria, como por ejemplo, RCN (*Radio Cognitive Network*).

El espectro radioeléctrico está muy sobrecargado especialmente en la banda de frecuencias libres (enfoque no propietario), como por ejemplo, la de 2.4 GHz, mientras que está totalmente desaprovechado en altas y bajas frecuencias, esto es debido a que actualmente, la fabricación de dispositivos que funcionen a altas o bajas frecuencias es muy costoso. Por tanto, nos vamos a centrar en la banda de frecuencias de 2.4 GHz, que es la banda en la que conviven la mayor parte de tecnologías que operan en bandas libres, destacando entre ellas las redes IEEE 802.11, también conocidas como redes Wi-Fi, pero sin olvidarnos de que también hay interferencias con los dispositivos *bluetooth*, comunicaciones móviles, microondas, GPS, alarmas, mandos a distancia...

Las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) son bandas de frecuencias sin licencia que se pueden usar libremente con un ligero control sobre ellas, por lo que cuando se va a construir una WLAN, podemos esperar que ya haya dispositivos utilizando el canal que se seleccione. Aunque hay varias técnicas de espectro expandido que respeten los límites de transmisión de baja potencia y que minimicen el efecto de las interferencias, la coexistencia de varios dispositivos en canales cercanos puede degradar en exceso el rendimiento de la red.

Las bandas sin licencia o bandas de frecuencias libres que se utilizan actualmente para la tecnología Wi-Fi son la banda de 2.4 GHz (banda ISM) y la banda de 5 GHz (banda UNII).

- **Banda de 2.4 GHz:** Esta banda tiene un mayor número de interferencias, hay tres canales no superpuestos, pero tiene un mayor alcance. Los estándares que se utilizan actualmente son 802.11b, 802.11g, 802.11n y 802.11ac.
- **Banda de 5 GHz:** Esta banda tiene un menor número de interferencias, hay veintitrés canales no superpuestos, pero por contra tiene un menor alcance. Los estándares que se utilizan actualmente son 802.11a, 802.11n y 802.11ac.

De entre todos los estándares de las redes inalámbricas, WLAN ha sido el más importante, este es, IEEE 802.11, que tiene varias revisiones, todas ellas emplean CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que es un protocolo basado en el múltiple acceso por detección de portadora evitando colisiones y todos tienen versión con estaciones base o ad hoc. Estas revisiones son las siguientes:

Estándar	Wi-Fi Alliance	Año	Banda de frecuencias	Velocidad máxima teórica
IEEE 802.11a	Wi-Fi 2	1999	5 GHz	54 Mbps
IEEE 802.11b	Wi-Fi 1	1999	2.4 GHz	11 Mbps
IEEE 802.11g	Wi-Fi 3	2003	2.4 GHz	54 Mbps
IEEE 802.11n	Wi-Fi 4	2004	2.4 GHz y 5 GHz	600 Mbps
IEEE 802.11ac	Wi-Fi 5	2013	2.4 GHz y 5 GHz	1.7 Gbps
IEEE 802.11ax	Wi-Fi 6	2019*	2.4 GHz y 5 GHz	10 Gbps

Tabla 1: Estándares Wi-Fi

*La aprobación del estándar se estima para el año 2019.

Asignación de canales

Nos vamos a centrar en la banda de 2.4 GHz ya que es la banda que más problemas ocasiona debido al menor número de canales disponibles y, por tanto, donde será de mayor interés solventar el problema de la asignación de canales para conseguir mayor eficiencia y utilidad de las redes Wi-Fi.

Un factor importante a tener en cuenta es que no existe un método de asignación de canales estándar para APs WLAN, y por ello, en la gran mayoría de los APs se utiliza la asignación de canales predeterminada, lo que lleva a un uso altamente ineficiente del espectro de las bandas ISM, ya que este está saturado. Esta situación es más crítica en la banda de 2.4 GHz, ya que conviven múltiples tecnologías inalámbricas y solamente hay tres canales no superpuestos disponibles en la banda mencionada. La banda de 2.4 GHz está definida por 13 canales (según los organismos reguladores europeos), cuyas portadoras van de 2.412 GHz del canal 1 a 2.472 GHz del canal 13 (el 14 es un canal prohibido que únicamente se utiliza en Japón). Otra cosa a tener en cuenta de la banda de 2.4 GHz es que únicamente podemos conseguir tres canales no superpuestos, ya que los canales consecutivos están separados por 5 MHz mientras que el ancho de banda de la portadora asignada al canal es de 22 MHz. Para considerar que dos canales no están superpuestos, las frecuencias centrales deben estar separadas por al menos 25 MHz. Ambas cosas podemos verlas en la siguiente figura:

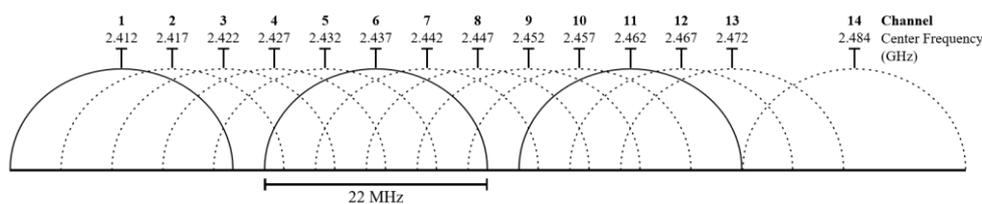


Figura 5: Espectro de frecuencias banda 2,4 GHz

Como se puede observar en la gráfica anterior, hay un fuerte solapamiento entre los distintos canales. Este solapamiento se puede resumir en la siguiente tabla:

Canal	Frecuencia inferior	Frecuencia central	Frecuencia superior	Canales solapados	Canales no solapados
1	2.401 GHz	2.412 GHz	2.423 GHz	2, 3, 4, 5	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
2	2.406 GHz	2.417 GHz	2.428 GHz	1, 3, 4, 5, 6	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
3	2.411 GHz	2.422 GHz	2.433 GHz	1, 2, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
4	2.416 GHz	2.427 GHz	2.438 GHz	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8	9, 10, 11, 12, 13, 14
5	2.421 GHz	2.432 GHz	2.443 GHz	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	10, 11, 12, 13, 14
6	2.426 GHz	2.437 GHz	2.448 GHz	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10	1, 11, 12, 13, 14
7	2.431 GHz	2.442 GHz	2.453 GHz	3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11	1, 2, 12, 13, 14
8	2.436 GHz	2.447 GHz	2.458 GHz	4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12	1, 2, 3, 13, 14
9	2.441 GHz	2.452 GHz	2.463 GHz	5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 14
10	2.446 GHz	2.457 GHz	2.468 GHz	6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14	1, 2, 3, 4, 5
11	2.451 GHz	2.462 GHz	2.473 GHz	7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	1, 2, 3, 4, 5, 6
12	2.456 GHz	2.467 GHz	2.478 GHz	8, 9, 10, 11, 13, 14	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
13	2.461 GHz	2.472 GHz	2.483 GHz	9, 10, 11, 12, 14	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
14	2.473 GHz	2.484 GHz	2.495 GHz	11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Tabla 2: Canales en espectro de 2,4 GHz

Como hemos visto, en esta banda solamente tenemos tres canales no superpuestos, como por ejemplo, los canales 1, 6 y 11. Usamos dichos canales porque si usamos dos canales superpuestos en el mismo espacio físico, se causarían demasiadas interferencias entre los sistemas. Por lo que los sistemas WLAN que utilizan un canal superpuesto no deben colocarse conjuntamente, ya que siempre habrá una reducción drástica o completa en el rendimiento de la red.

Dentro de los esquemas de asignación de canales basados en MAC (*Media Access Control*) podemos clasificar en dos métodos las redes WLAN en función de cómo se gestionan. Estos son:

- **Centralizado:** Un controlador central recopila información del tráfico de cada canal y de los APs para asignar un canal a cada uno de ellos. Este método puede generar un rendimiento óptimo ya que para la asignación de canales tiene en cuenta el tráfico de la red y el uso de los canales, pero por contra, si un controlador tiene que administrar un gran número de APs se requerirá un mayor tiempo para encontrar una asignación óptima.
- **Distribuido:** El AP es el encargado de recopilar la información del tráfico del canal y de los distintos APs vecinos para finalmente determinar cuál es el mejor canal que utilizar de forma autónoma. Esto hace que el tiempo para encontrar una asignación óptima no sea excesivo incluso si hay un gran número de APs desplegados o aumenta el número de APs en la red.

Las redes administradas centralmente son generalmente la de campus universitarios, oficinas, ... mientras que las redes no coordinadas son típicas de barrios residenciales, restaurantes, ...

La implementación exitosa de este tipo de redes requiere mecanismos para solventar los problemas de rendimiento, estos mecanismos pueden ser el balanceo de carga (utilizado generalmente en la implementación de redes centralizadas), el control de potencia y la detección de portadora (utilizado en redes no coordinadas), o la asignación de canales (utilizada tanto para redes centralizadas como para no coordinadas) donde se asigna un canal de frecuencia a cada AP para su uso durante un cierto tiempo. En este último tipo de mecanismos es en el que nos vamos a centrar en este trabajo.

El principal problema de estas redes son las interferencias causadas en la red Wi-Fi. Los principales tipos de estas interferencias son:

- **Interferencia cocanal:** Este tipo de interferencias son las causadas cuando varias señales deseadas se transmiten por el mismo canal. Si múltiples APs operan en el mismo canal el rendimiento de la red se ve reducido debido a estas interferencias.
- **Interferencia de canal adyacente:** Este tipo de interferencias son las causadas cuando se transmite por canales que se encuentran solapados. Si múltiples APs vecinos operan en canales adyacentes el rendimiento de la red se ve reducido debido sus interferencias.

Según [12], dentro de las redes WLAN IEEE 802.11 podemos distinguir dos estrategias importantes:

- **Asignación de canales:** Se define como una estrategia en la que a cada AP se le asigna un canal de tal manera que se minimiza la interferencia generada como resultado de dicha asignación, por lo que se maximiza el rendimiento de la red. Todas las estrategias de asignación de canales tienen por objetivo disminuir las interferencias, esto es, la optimización, aunque cada esquema modela de forma diferente la interferencia.
- **Ubicación de AP:** Se define como una estrategia en la que los APs se asignan e instalan en sitios determinados para proporcionar la mayor cobertura posible a sus clientes bajo unos requisitos de calidad de servicio (QoS). Esta estrategia se utiliza en la fase inicial de la planificación de la red combinándola con la asignación de canales para una red centralizada. En una red no coordinada, lo principal es la asignación de canales.

Por tanto, dentro de la asignación de canales podemos diferenciar entre dos tipos:

- **Asignación de canales con ubicación de AP:** Fue pensado para redes administradas centralmente, ya que el administrador central tiene un control completo sobre la ubicación de todos los APs y su asignación de canal. El principal desafío es superar la irregularidad de la forma de las celdas y las diferentes demandas de tráfico, para ello, se recurre a la asignación de canales y la colocación de APs. Por tanto, un requisito importante es una estimación precisa del tráfico en el área en la que se instalarán los APs.
- **Asignación de canales sin ubicación de AP:** En este enfoque no importa dónde estén ubicados los APs, ya que se centra únicamente en la asignación de canales. El principal problema que se pretende abordar es la interferencia inducida por la contención MAC entre los APs, aunque actualmente se tienen también en cuenta las interferencias inducidas por la contención MAC entre los APs y los clientes.

Para las redes administradas centralmente, podemos distinguir distintos enfoques tanto para la asignación de canales con ubicación como sin ubicación de AP, algunos de estos son:

- Asignación de canales con ubicación de AP:
 - **Enfoque tradicional:** En este enfoque el problema de la asociación de canales se resuelve tras ubicar los APs y tras varias pruebas se va modificando la ubicación de los APs hasta conseguir un mejor rendimiento. El problema de asignación de canales se trata como un problema de coloreado del grafo donde cada AP representa un vértice y un canal no superpuesto un color. El objetivo es asignar los canales que no se superponen a los APs de forma que se minimice la superposición de la cobertura cocanal entre celdas adyacentes.
 - **Enfoque de programación lineal de enteros (ILP):** En este enfoque se resuelven los problemas de asignación de canales y ubicación de APs simultáneamente ya que no solo considera el radio de cobertura sino también el equilibrio de carga entre los APs, para ello, lo que se hace es distribuir los clientes de manera que se maximice el rendimiento de la red. El objetivo es minimizar la utilización del canal en cada AP mientras se satisface la demanda de tráfico asignando cada punto de demanda a un AP.
 - **Enfoque de mapa de prioridad:** En este enfoque el problema de asignación de canales se resuelve junto con el de la colocación de APs, para ello, un plano se divide en píxeles y cada uno se prioriza según sus requisitos de tráfico para crear un mapa de prioridad. Posteriormente se crea un conjunto de ubicaciones de APs para dar servicio acorde a la prioridad y a cada conjunto de APs se les asigna un canal no superpuesto en función de su prioridad. Si se agotan los canales no superpuestos, se siguen otros algoritmos de asignación de canal para los APs restantes.
 - **Algoritmo de parcheo:** En este algoritmo el problema de asignación de canales y de ubicación de APs se resuelve conjuntamente considerando únicamente el tráfico ascendente. Se calcula el rendimiento de cada cliente para los clientes de una celda sin tener en cuenta las interferencias con los del resto de celdas, para ello se realiza una estimación del rendimiento ya teniendo en cuenta los clientes de áreas celdas adyacentes. El objetivo es maximizar el rendimiento y la equidad entre los clientes.
 - **Enfoque orientado a la cobertura:** En este enfoque el problema de la asignación de canales y la ubicación de AP se optimizan de forma secuencial y conjunta. Se utiliza el modelo de programación lineal de enteros calculando el rendimiento neto teniendo en cuenta la potencia recibida. Tras esto, se realiza una optimización conjunta, para ello se coloca el AP seguido de su asignación de canal combinándolo linealmente. El objetivo del problema de ubicación AP es la maximización del rendimiento total en el área de servicio mientras se satisface el número especificado de AP.

· Asignación de canales sin ubicación de AP:

- **DSATUR:** Es un enfoque basado en la coloración de vértices, los vértices de un grafo son los APs y los bordes representan las interferencias entre puntos de acceso adyacentes, también es necesario un conjunto de colores que representan a los canales no superpuestos. El grado de saturación es el número de vértices de diferente color a los que el vértice es adyacente, estos colores son colores no admisibles para el vértice en cuestión. El objetivo del problema es el coloreado de los vértices de tal manera que se utilicen el menor número de colores posibles y que los nodos conectados que no interfieran tengan el mismo color.
- **CFAssign-RaC:** Este algoritmo busca resolver el problema de la asociación de canales junto con el del equilibrio de carga a través de una definición y clasificación de las interferencias empleando un conjunto de colores sin conflicto. Se asignan canales a los APs para que los clientes se distribuyan de tal manera que se minimice el conflicto. Para ello se tienen en cuenta como el rango y los conjuntos de interferencia reflejan las condiciones reales del canal. El objetivo del problema es maximizar el número de clientes con conflicto cero.
- **Local-Coord basada en mediciones:** En este algoritmo se trata el problema de la asociación de canales como la búsqueda de la menor interferencia, que se consigue con una función de costo, que es la interferencia ponderada entre las capturadas por los clientes como por los APs en la red. El cliente mide la potencia de interferencia en cada canal y la promedian para informar a sus respectivos APs que también la medirán. Un mayor volumen de tráfico crea mayor interferencia y una potencia alta indica que la interferencia es menor. Una variante de este algoritmo es Global-Coord.

Un pequeño esquema donde se pueden ver algunas de las características de estos enfoques en redes centralizadas con y sin ubicación de AP puede ser el siguiente:

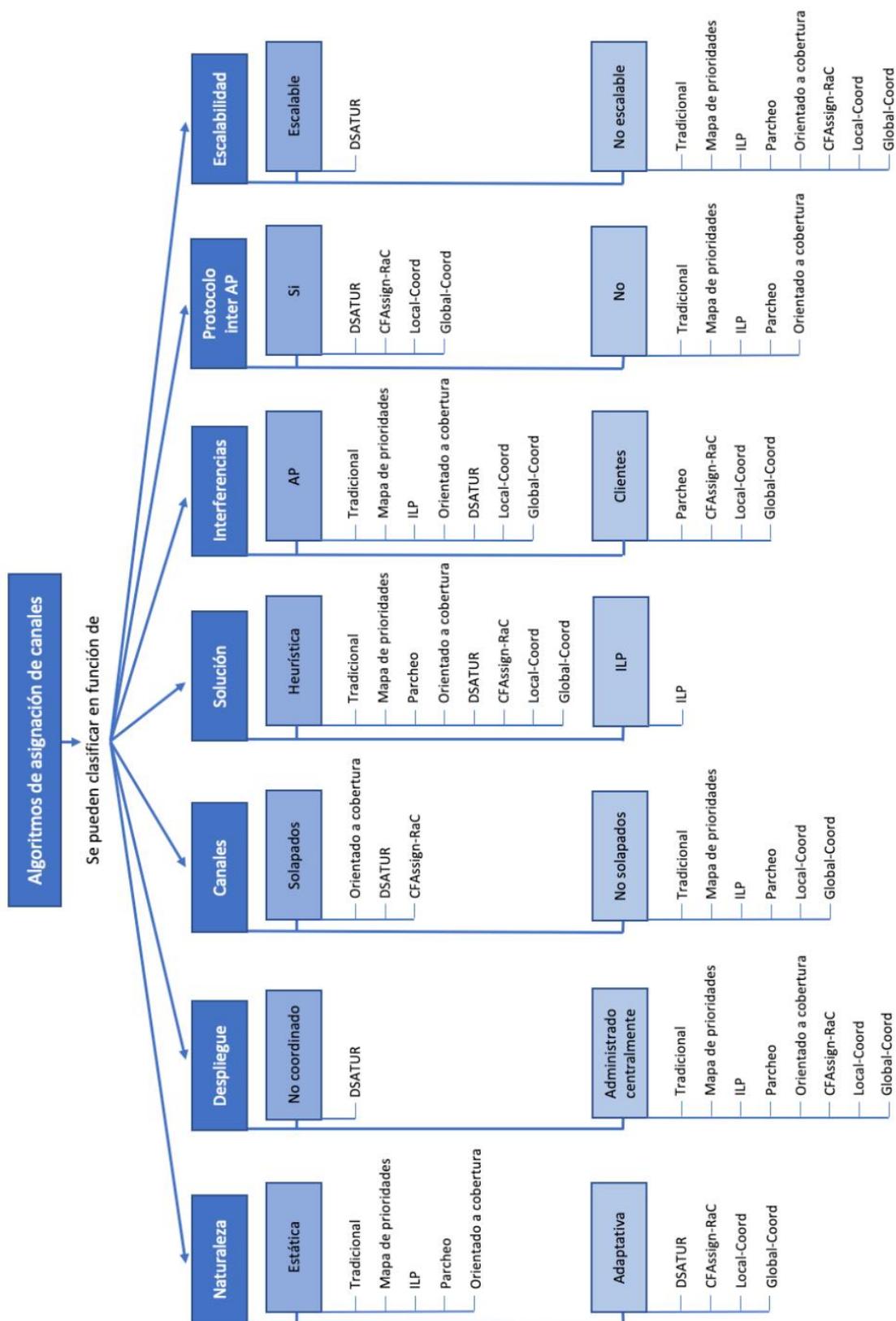


Figura 6: Características técnicas en redes centralizadas

Para las redes no coordinadas, podemos distinguir distintos enfoques únicamente para la asignación de canales sin ubicación de AP, algunos de estos son:

- **Búsqueda de canales menos congestionados (LCCS):** Este algoritmo trata el problema de la asignación de canales como a búsqueda del menos congestionado, pero hay varias formas de interpretar el canal menos congestionado, una de ellas puede ser con el menor tráfico, otra con el menor número de clientes operando en el canal, ... El AP escanea y busca periódicamente el canal menos congestionado.
- **Enfoque MinMax:** En este enfoque el problema de la asociación de canales se trata desde el punto de vista de AP suponiendo en que si tienen demasiada carga pueden degradar el rendimiento de la red considerando únicamente el tráfico descendente. Para ello va buscando las interferencias y la utilización efectiva del canal por parte de cada AP. Se comienza con una asignación de canales aleatoria y un algoritmo heurístico para reajustar la utilización efectiva de cada canal. El objetivo es minimizar la máxima utilización efectiva de los canales por parte de los APs con mayor carga.
- **Enfoque MinMax II:** Este enfoque es similar al anterior, solo que en este caso es dinámico, es decir, la estimación de los clientes activos se hace en tiempo real para cada periodo de asignación de canales. Otra diferencia importante es que en lugar de minimizar la utilidad efectiva lo que hace es minimizar la utilidad máxima del canal más sobrecargado teniendo en cuenta la carga y las interferencias cocanal.
- **$H_{\min\max}$ / H_{sum} - Enfoque de coloración ponderada:** En este enfoque el problema de asociación de canales se trata como un problema de coloración del vértices de suma mínima ponderada con diferentes ponderaciones en los bordes de interferencia. Esta interferencia se captura con el factor de interferencia y la función de peso. El objetivo es minimizar la interferencia máxima desde el punto de vista de los clientes. H_{sum} solo es adecuado para redes supervisadas por el mismo administrador, mientras que $H_{\min\max}$ es más adecuado para las redes administradas por diferentes administradores.
- **Enfoque Pick-Rand y Pick-First:** Este enfoque trata el problema como la ponderación de interferencia, que depende de la interferencia de canal adyacente, la potencia de transmisión y la pérdida de trayectoria entre APs. El objetivo es asignar canales superpuestos minimizando la interferencia ponderada total desde el punto de vista del AP. Pick-Rand elige el canal aleatoriamente, mientras que Pick-First elige el primer canal de la lista ordenada ascendentemente.
- **Enfoque Pick-Rand y Pick-First II:** Este enfoque es similar al anterior, pero en este se incorpora el equilibrio de carga, para ello incorpora un indicador de congestión que se define como la proporción de tasas de datos agregadas al ancho de banda disponible del AP. El objetivo es minimizar la congestión máxima del AP más congestionado y tras solventar el problema se recurre a la asignación de canales.
- **Enfoque de salto de canal:** En este enfoque propone un algoritmo de asignación de canal distribuido en el que a cada AP se le asigna una secuencia de canales por la que se va pasando de uno a otro en el tiempo con el objetivo de promediar los rendimientos de los APs a largo plazo. Para el correcto funcionamiento, todos los APs deben estar sincronizados para que realicen el salto del canal en el mismo instante de tiempo.
- **No-Coord basada en mediciones:** Este algoritmo es similar al algoritmo *Local-Coord* pero en este se evita la coordinación de APs y solo se produce un cambio de canal si la interferencia ponderada en base al nuevo canal es mas baja que la anterior.

Un pequeño esquema donde se pueden ver algunas de las características de estos enfoques en redes no coordinadas sin ubicación puede ser el siguiente:

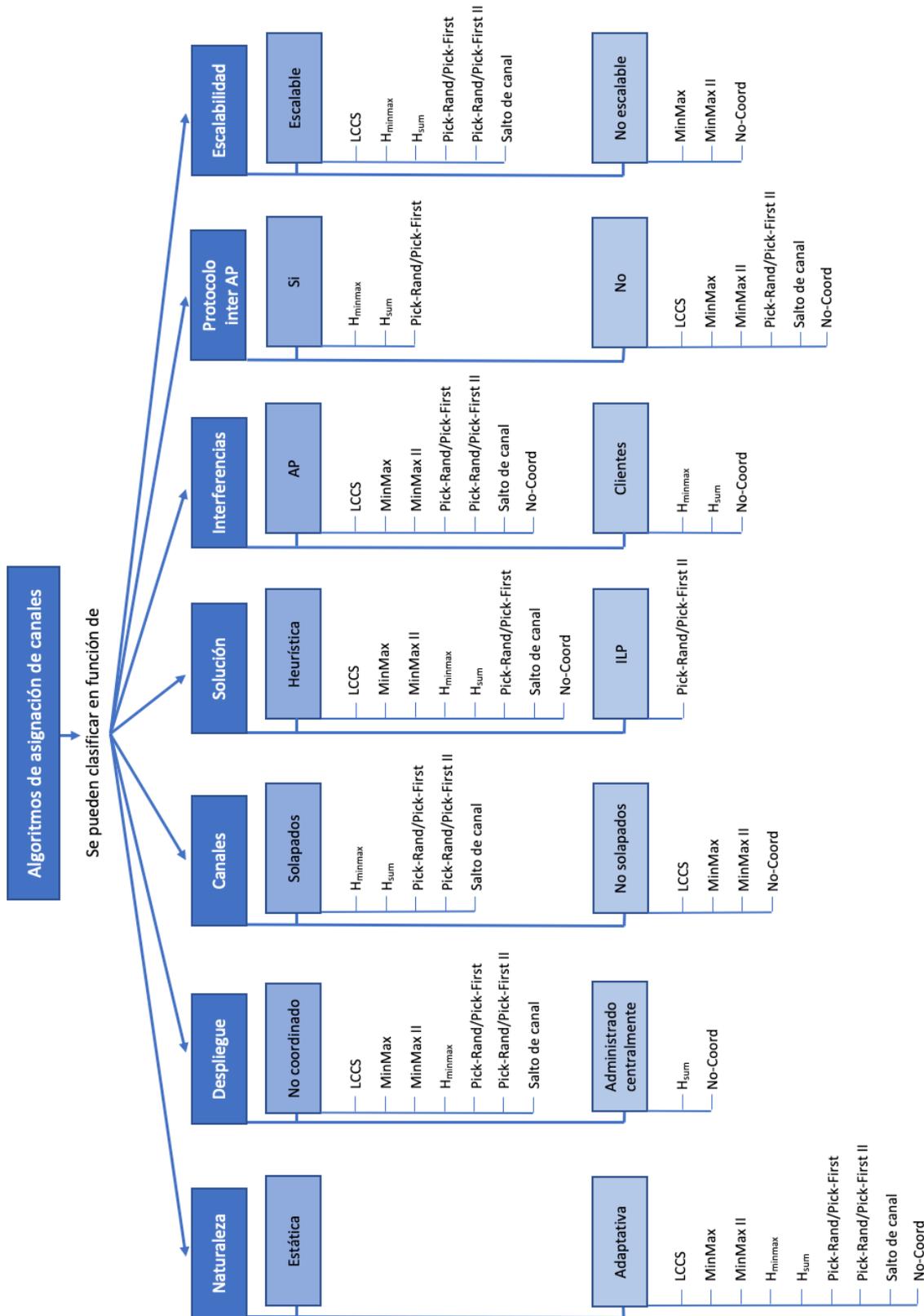


Figura 7: Características técnicas en redes no coordinadas

En los esquemas de clasificación que se han propuesto para las distintos enfoques y algoritmos se han considerado importantes los siguientes aspectos de clasificación:

- La frecuencia con la que se realiza la asignación de canales.
- El tipo de implementación a la que es aplicable la asignación de canales.
- El tipo de canales utilizados.
- Como se obtienen soluciones de asignación de canales.
- Desde que punto de vista se trata a la interferencia.
- Saber si es o no necesaria la comunicación inter-AP para la asignación de canales.
- La escalabilidad del sistema (si existe solución para redes relativamente grandes).

Como podemos comprobar, los esquemas estáticos solo se ejecutan una vez, por lo que su complejidad no es muy importante, aunque es clave para que la mayoría de los esquemas recurran a técnicas heurísticas. Estos esquemas se basan en las redes centralizadas mientras que los adaptativos pueden ser en redes centralizadas o no coordinadas. Al principio, en las redes se utilizaban únicamente los canales no solapados en este tipo de optimizaciones y únicamente se tenían en cuenta las interferencias desde el punto de vista de los APs, pero actualmente se intentan utilizar todos los canales y tener en cuenta también las interferencias desde el punto de vista de los clientes. Por último, también podemos ver como los esquemas de asignación de canales en entornos no coordinados son escalables debido a su ejecución distributiva, mientras que en los entornos centralizados no son escalables debido a su control centralizado privilegiado.

Algoritmos de asignación de canales empleados

Dentro de los algoritmos de asignación de canales que es el fin de este trabajo podemos diferenciar varias técnicas, algunas serán propuestas interesantes como KCKC, AIIM o HZNA, que serán las que se implementarán, pero hay también otras técnicas como Random, LCCS y SA que hay que implementar para comprobar si las propuestas mencionadas mejoran o no las prestaciones de las técnicas implementadas actualmente o de forma aleatoria, que no conlleva ningún coste.

Random

El algoritmo de asignación de canales aleatorio (*random*), es el menos costoso, ya que asigna a cada AP un canal de forma aleatoria (el AP es el que escoge un canal entre los disponibles), y por tanto, no tiene en cuenta ningún factor para hacerlo de forma eficiente. Aunque este algoritmo tan rudimentario no sea realmente útil para solventar el problema de la asignación de canales, ni se espere que tenga unas prestaciones elevadas, si lo va a ser para hacer comparaciones con los algoritmos de asignación de canales propuestos que implementaremos y que si que tienen en cuenta algún factor. Un algoritmo será más eficiente que *random* si se obtienen mejores valores de utilidad, si no es así, el algoritmo implementado no tendría sentido, ya que no solucionaría el problema que tratamos.

LCCS (*Least Congested Channel Scan*)

El algoritmo de asignación de canales LCCS es una técnica que ya tiene en cuenta algún factor para su implementación. Esta técnica heurística es de las más empleadas en la actualidad y se basa en que cada punto de acceso escoge el canal Wi-Fi menos congestionado, esto es, en el que se encuentre una menor interferencia. Esta técnica resulta de interés para comparar otras propuestas de la literatura con la técnica más extendida e implementada de la actualidad.

Esta técnica es mejor que *random*, pero aún es mejorable, ya que con otras técnicas implementadas se consiguen mejores resultados. Este algoritmo también nos servirá como comparación para saber cuáles de los algoritmos propuestos tienen una mayor eficiencia que lo que se utiliza actualmente, esto es, con qué técnicas se consiguen mayores utilidades que con LCCS y *random*.

Esta técnica LCCS fue propuesta por Achanta M. [13] y está basada en que cada punto de acceso realice la búsqueda del canal con menos carga, esto es, aquel canal que tenga un menor número de clientes asociados. Una vez encontrado, conmuta a dicho canal hasta que en un próximo escaneo se encuentre un canal menos congestionado. Para conseguir esto, cada punto de acceso analiza cada canal en busca de tramas lanzadas por AP vecinos (cada trama contiene información acerca del número de clientes asociados a cada AP), conociendo así los clientes asociados a cada uno de sus vecinos. De esta manera, después de escanear todos los canales, el punto de acceso es capaz de conocer cuántos clientes están asociados a cada canal y, por tanto, capaz de elegir aquel canal con menor congestión o carga. Un dato importante que destacar del algoritmo LCCS es que presupone que todos los clientes generan la misma cantidad de tráfico, en consecuencia, a mayor número de clientes conectados, mayor cantidad de tráfico.

SA (*Simulated Annealing*, temple simulado)

El algoritmo de asignación de canales SA (temple simulado) es una técnica de optimización no lineal generalizada. Para explicar en qué consiste, es conveniente hablar antes del protocolo de interacción para las negociaciones, que van desde el modelo clásico de ofertas alternas hasta la de protocolos basados en subastas. Suponiendo que los escenarios de negociación que surgen del problema de asignación de canales en WLAN IEEE 802.11 serán altamente no lineales se llevará a cabo un protocolo de negociación, que en su versión más simple, será el siguiente:

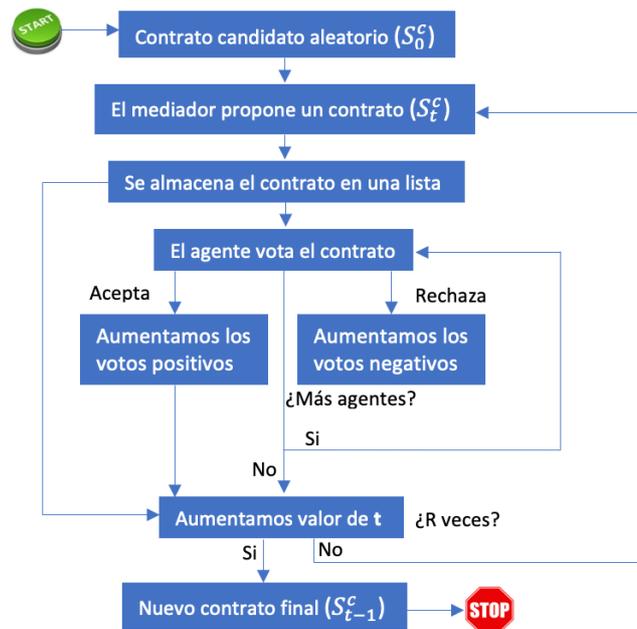


Figura 8: Esquema general SA

Los pasos que sigue este protocolo de negociación de forma textual son:

1. Comienza con un contrato candidato generado aleatoriamente (S_0^c). En nuestro caso, esto significa asignar un canal aleatorio a cada punto de acceso, o lo que es lo mismo, una coloración del grafo.
2. En cada iteración t , el mediador propone un contrato S_t^c al resto de agentes.
3. Cada agente acepta o rechaza el contrato propuesto por el mediador.
4. El mediador genera un nuevo contrato S_{t+1}^c a partir de los contratos anteriores y de los votos recibidos de los agentes, y el proceso pasa al Paso 2.

El algoritmo continúa hasta que se repita un número determinado de veces o se cumpla alguna otra condición para detenerse. Este protocolo tal y como está descrito es muy genérico, faltaría completarlo con una definición del mecanismo de decisión de los agentes o las estrategias que utilizarán los agentes negociadores y el mediador. En nuestro caso, el algoritmo SA es por parte del agente, aunque hay más algoritmos que se pueden proponer nos vamos a centrar en él, mientras que para el mediador definiremos un mecanismo de mediación de texto único para la generación de nuevos contratos. Estos algoritmos utilizados serán definidos a continuación.

El mecanismo de decisión para el mediador es el siguiente:

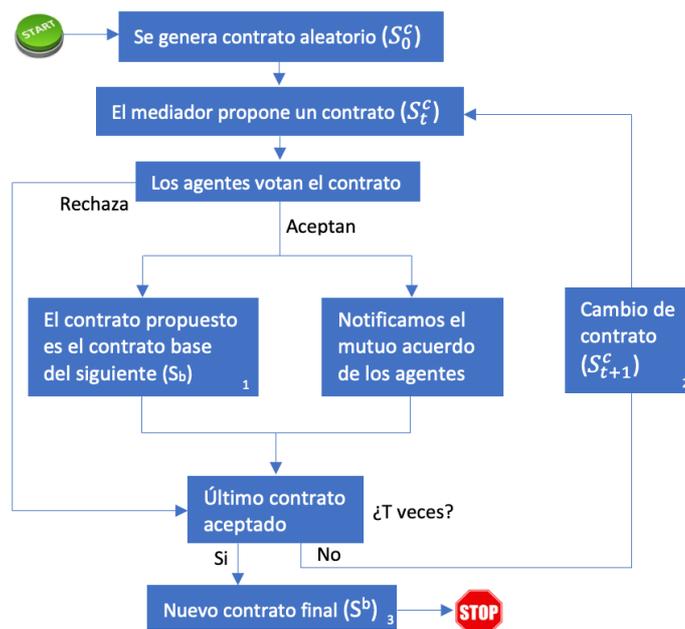


Figura 9: Esquema mecanismo de decisión SA

- Si en un instante t todos los agentes aceptan el contrato que propone el mediador, S_t^c , este contrato se utilizará como el contrato base S^b para generar el siguiente contrato S_{t+1}^c (1). En caso de que no todos los agentes acepten el contrato, se utilizará como contrato base el último contrato aceptado.
- Para generar el siguiente contrato S_{t+1}^c , el mediador realiza un cambio en el contrato base, S^b , este cambio consiste en mutar uno de sus problemas al azar (2). En nuestro caso, como estamos ante un problema de coloración de grafo, este cambio sería el seleccionar un nuevo canal para que opere un punto de acceso al azar.
- Tras llevar T iteraciones, el mediador muestra un nuevo contrato final, que será el último contrato aceptado por todos los agentes (3).

El mecanismo de decisión para los agentes es en el que nos vamos a centrar más, ya que es SA, que es la técnica que vamos a utilizar en este trabajo para realizar la comparación con los distintos algoritmos de asignación de canales implementados, aunque hay otras técnicas como pueden ser los escaladores que en este caso no le daremos importancia. Este mecanismo consiste en que si un contrato produce una pérdida de utilidad respecto al último contrato aceptado mutuamente por los agentes, existe una probabilidad de que el agente lo acepte de todas formas. Esta probabilidad (P_a) depende de la pérdida de utilidad asociada al nuevo contrato propuesto por el mediador (Δu) y depende también de un parámetro conocido que llamaremos temperatura de templado (τ). Esta probabilidad está definida de la siguiente forma:

$$P_a = e^{\frac{-\Delta u}{\tau}}$$

Esta temperatura de templado comienza en un valor inicial y va disminuyendo linealmente a lo largo de las iteraciones del algoritmo hasta llegar a cero acorde con la siguiente fórmula:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right)$$

El pseudocódigo de este algoritmo de votación del templado que emplea el agente es el siguiente:

Inputs:

$A_p \in A$: Conjunto de puntos de acceso que pertenecen al proveedor.
 S_t^c : Contrato candidato enviado por el mediador en un tiempo t .
 S^b : Último acuerdo mutuo notificado por el mediador.
 τ_0 : Temperatura de templado inicial.

Output:

$v \in \{\text{aceptar, rechazar}\}$: Voto de este agente.

Algoritmo:

```

if  $S^b = \emptyset$  then
  |  $U^b = -\infty$ 
else
  |  $U^b = \text{calcularUtilidad}(A_p, S^b)$ 
end
 $U^c = \text{calcularUtilidad}(A_p, S_t^c)$ 
 $\Delta u = U^b - U^c$ 
 $\tau = \tau_0(1 - \frac{t}{T})$ 
 $P_a = e^{-\frac{\Delta u}{\tau}}$ 
if  $\text{rand}(0,1) \leq P_a$  then
  |  $v = \text{aceptar}$ 
else
  |  $v = \text{rechazar}$ 
end

```

El algoritmo que sigue esta propuesta es el siguiente:

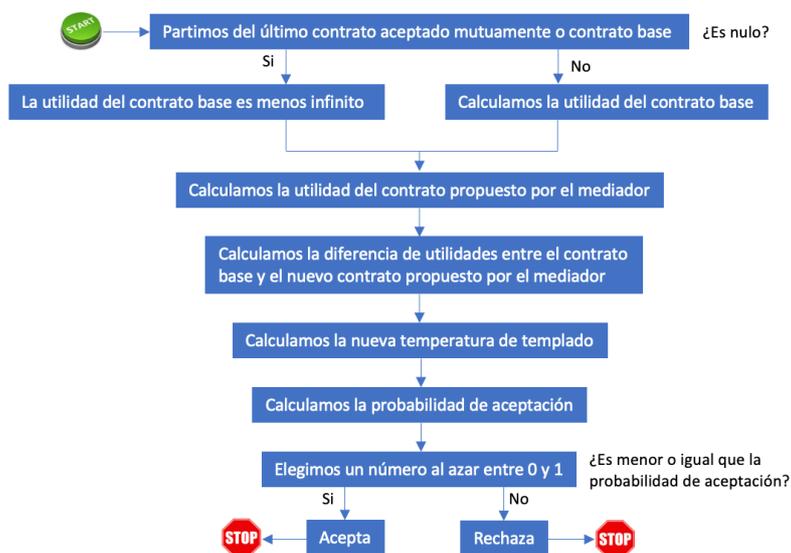


Figura 10: Esquema votación del templado por el agente

Las técnicas de templado simulado dan resultados muy satisfactorios en la negociación de espacios de servicios no lineales. Si comparamos los optimizadores codiciosos con el algoritmo de templado, la diferencia es que los primeros tienden a quedarse en un local óptimo mientras que los segundos tienden a salir de él. Para analizar su complejidad se utilizan heurísticas que alcanzan un número concreto de iteraciones, donde para calcular la complejidad de cada iteración primero debemos calcular la utilidad del coloreado del grafo, que requiere verificar los vecinos de cada nodo, por tanto, la complejidad de nuestros resultados está en $O(n^2)$, donde n es el número de nodos en la red.

KCKC

Kwon et al. [11] proponen un algoritmo de selección de canales distribuido en el que se tienen en cuenta tanto la contención ascendente como la descendente, esto está muy relacionado con los APs y STAs que interfieren, esto es, los APs adyacentes y las STAs no asociadas que operan dentro del radio de cobertura de un AP. Pero un AP no puede obtener información de dichas STAs ya que los mensajes de control que intercambian no están definidos en el estándar IEEE 802.11. Por tanto, el objetivo del algoritmo propuesto por Kwon es que los APs reconozcan el número de APs y STAs que interfieren para así elegir el canal con menor congestión.

En este algoritmo propuesto por Kwon et al., el problema de la selección de canales es tratada desde el punto de vista de los APs. Lo que intenta este algoritmo es utilizar el canal con menor congestión, esto es, con menos interferencias.

Este algoritmo está propuesto para las redes con un esquema distribuido, esto es, sistemas WLAN en el que los APs son los encargados de recopilar la información necesaria para ellos mismos escoger el canal en el que deben actuar. Está pensado para un esquema distribuido porque en los esquemas centralizados, donde hay un controlador central, a mayor número de APs que debe administrar, requiere un tiempo de cómputo muy superior para obtener una solución óptima al problema de asignación de canales. Mientras que para redes con la gestión de canales distribuida el tiempo de cómputo es relativamente bajo.

Este autor nos afirma que los algoritmos CACAO (*Client-Assisted Channel Assignment Optimization*) [8] y LCCS (*Least Congested Channel Scan*) [13] no son técnicas adecuadas para encontrar el canal menos congestionado en un entorno de red WLAN en el que existen transferencias ascendentes y descendentes, y por ello, propone una técnica mejorada que llamaremos KCKC.

Propuesta de esquema de selección de canal distribuido

Para este esquema que proponen Kwon et al. lo primero es definir elementos y procedimientos de información de baliza adicional del estándar IEEE 802.11 para saber el número de STAs interferentes en cada AP, para ello define un elemento adicional llamado información de carga del canal que consta de cinco campos:

- **ID de elemento:** indica que una trama baliza contiene información de carga del canal en el cuerpo de la trama.
- **Longitud:** longitud total de un elemento de información de canal.
- **SSID (*Service Set Identifier*):** Identificador del conjunto de servicios.
- **Número de canal:** número del canal que se utiliza.
- **Lista de carga del canal:** consta de dos subcampos:
 - El primer subcampo indica el SSID de un AP vecino detectado por las STAs.
 - El segundo subcampo es el número de STAs que detectan el AP con SSID en el primer campo.

Esta lista de carga de canal será la que se utilice para estimar el número de STAs que interfieren y están ubicadas en el área de cobertura de un AP.

Una representación de estas tramas baliza con sus respectivos subcampos de interés mencionados anteriormente puede ser la siguiente:

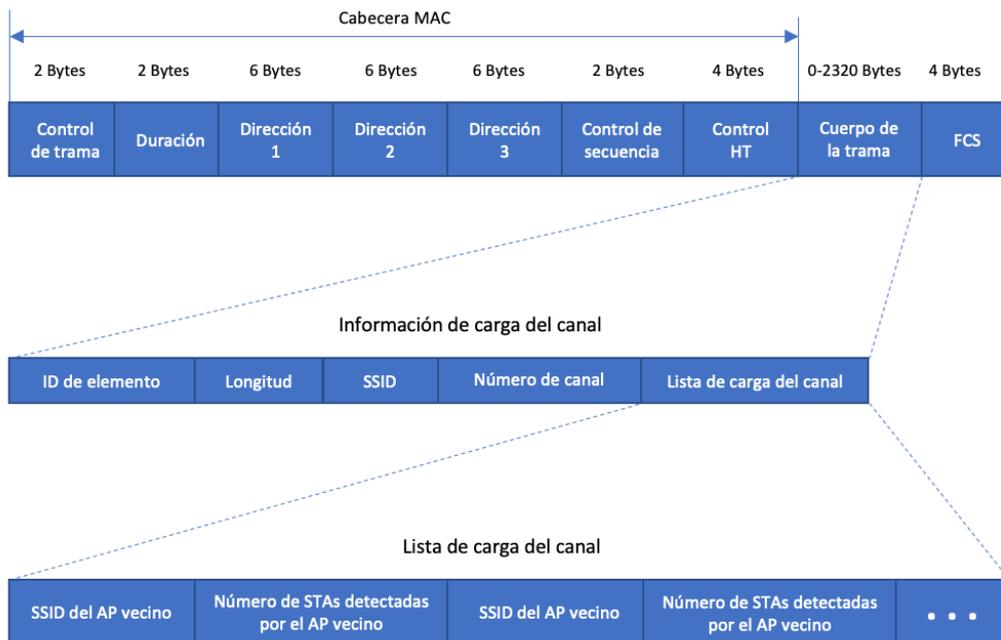


Figura 11: Representación de tramas baliza

El procedimiento propuesto se resume en el siguiente esquema que se puede dividir en dos fases, una fase inicial que se realizará únicamente en el momento que se encienda un AP por primera vez y una segunda fase de selección de canal que se realizará periódicamente en cada AP:

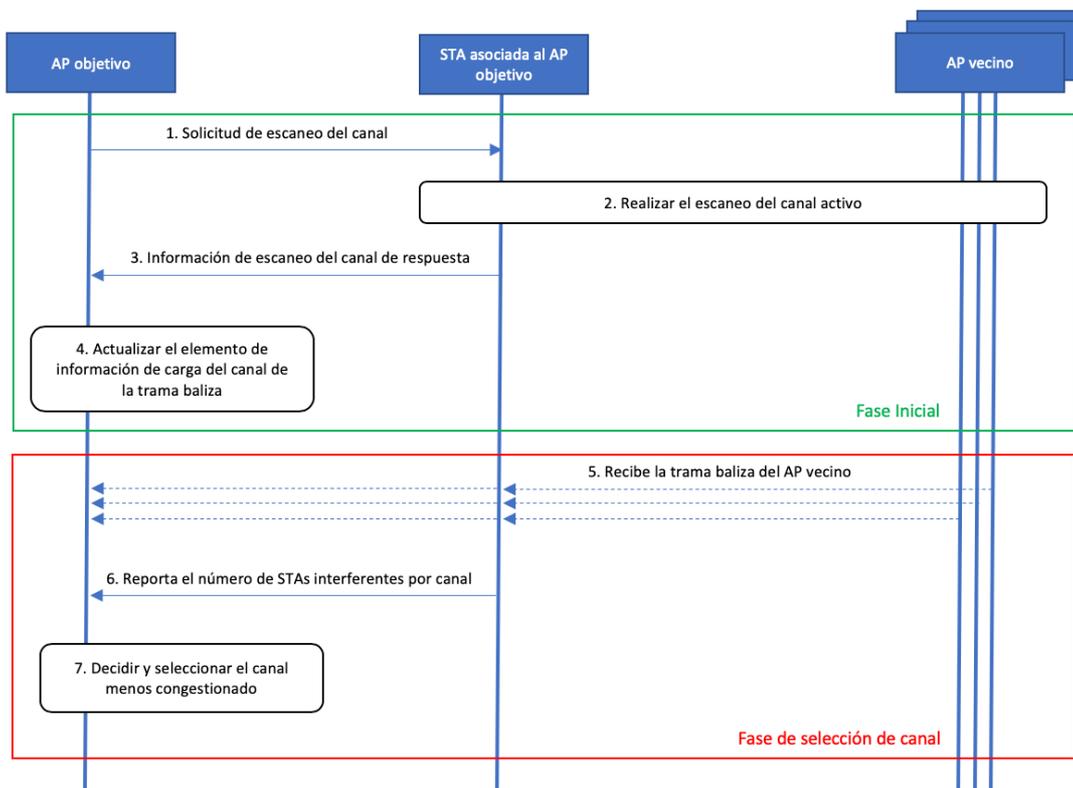


Figura 12: Esquema de intercambio de mensajes

En la fase inicial, que corresponde con los pasos uno a cuatro, el AP transmite una trama baliza con su respectiva información de carga del canal inicial, pero con el campo “lista de carga del canal” vacío inicialmente y se realiza lo siguiente:

1. Solicitud de escaneo del canal.

El AP solicita un escaneo activo de canales a sus STAs asociados para actualizar de esta forma el campo “lista de carga del canal”.

2. Realizar el escaneo del canal activo.

Se emplea el procedimiento de búsqueda de canales activos del estándar IEEE 802.11, que consiste en que un STA genera y difunde una trama de solicitud de sondeo a sus APs vecinos y estos envían tramas de respuesta.

3. Información de escaneo del canal de respuesta.

Cada STA reporta la información del escaneo del canal con los SSID de su AP asociado, este SSID se adquieren a través de las tramas de respuesta que enviaron los APs vecinos a los STAs.

4. Actualizar el elemento de información de carga del canal de la trama baliza.

El AP verifica el SSID recibido y cuenta el número de STAs que reportan el SSID para posteriormente actualizar los subcampos del campo “lista de carga del canal”, esto es, los SSID de los APs vecinos y el número de STAs que detectan estos APs.

En la fase de selección de canal, que corresponde con los pasos cinco a siete, los APs estiman el número de STAs interferentes en cada canal y seleccionan el canal con menor número de STAs interferentes, realizan los siguientes pasos:

5. Recibir la trama baliza del AP vecino.

Los APs y sus STAs realizan una exploración pasiva de canales para escuchar la trama baliza de sus APs vecinos. Si los APs encuentran su SSID en el primer subcampo del campo “lista de carga del canal” en la información de carga del canal, verifican por medio del segundo subcampo el número de STAs interferentes que estén ubicadas en su área de cobertura.

6. Reportar el número de STAs interferentes por canal.

Si un STA está ubicada fuera del área de cobertura de un AP vecino, el AP no podría recibir su información, para ello, las STAs verifican el campo “lista de carga del canal” e informan al AP con el número de STAs interferentes por canal.

7. Decidir y seleccionar el canal menos congestionado.

Cuando el AP cuenta con el número de STAs interferentes en cada canal, esto es, recibe la trama baliza y el mensaje de informe de sus STAs, determina el canal con menor número de STAs interferentes como el canal menos congestionado y lo selecciona.

Un ejemplo para poder entender mejor los problemas que se presentan en dicho algoritmo y el contenido de las tramas baliza puede ser el siguiente:

- Dado un escenario como el siguiente:

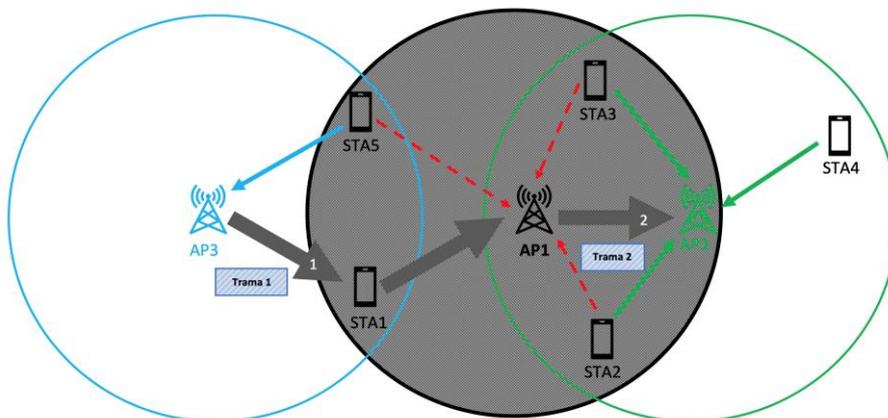


Figura 13: Escenario ejemplo para técnica de KCKC

Donde se representan tres puntos de acceso (AP1, AP2 y AP3) con sus respectivos radios de cobertura y supongamos que el AP1, AP2 y AP3 operan en los canales 1, 6 y 11 respectivamente. Cada AP tiene sus STAs asociadas:

- **AP1:** STA1.
- **AP2:** STA2, STA3 y STA4.
- **AP3:** STA5.

También vemos donde las distintas STAs provocan interferencias, en este caso, tanto STA2 como STA3 como STA5 crean interferencias en el AP1, el resto están libres de interferencias.

Supongamos que el AP1, AP2 y AP3 operan en los canales 1, 6 y 11 respectivamente.

Uno de los problemas que surgen es que el STA5 crea interferencias sobre el AP1, pero el AP3 que es el asociado a STA5 no se encuentra dentro de su alcance, por lo que AP1 sería incapaz de detectarlo, por tanto, no podríamos sacar esta información de la trama baliza. Para solventar este problema, AP1 puede obtenerlo del mensaje de informe de medición del STA5, que se asocia con AP5.

El contenido más relevante de las tramas baliza (Trama 1 y Trama 2) sería el siguiente:

- **Trama 1:**

SSID	Número de canal	SSID del AP vecino	Número de STAs detectadas por el AP vecino
AP3	11	AP1	1

Figura 14: Trama 1 asignación KCKC

- **Trama 2:**

SSID	Número de canal	SSID del AP vecino	Número de STAs detectadas por el AP vecino
AP2	6	AP1	2

Figura 15: Trama 2 asignación KCKC

*Si AP1 tuviera que elegir entre el canal 6 y el canal 11, elegiría el canal 11 ya que es el menos congestionado, tiene únicamente un STA detectado.

Implementación del esquema de selección de canal distribuido

El esquema detallado completo empleado para la implementación del algoritmo de selección de canal distribuido propuesto en [11] es el siguiente:

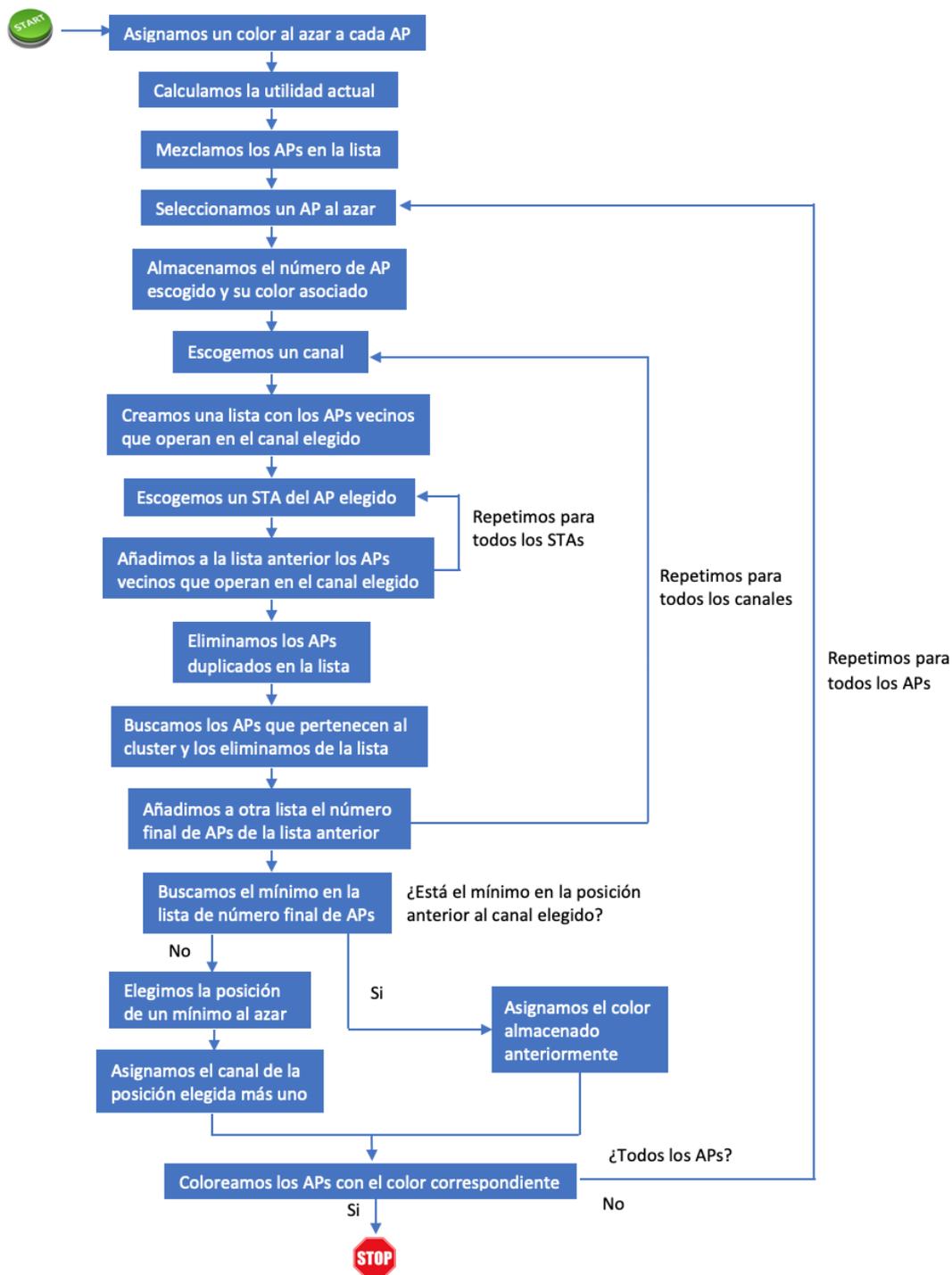


Figura 16: Esquema de implementación KCKC

*Existe una variable para decir con cuantos canales deseamos trabajar, normalmente será para tres u once canales.

AIIM

Abeyskera et al. [10] nos proponen un esquema maestro-esclavo para la selección de canales, esta técnica consiste en que cada AP selecciona su canal operativo de forma que se equilibre a carga de tráfico en cada canal y las interferencias sean lo menores posibles. Para ello, trata la asociación de canales como un problema de coloreado del mapa con el objetivo de asignar canales no superpuestos para minimizar la superposición de la cobertura cocanal. Los clientes van a ser caracterizados por su intensidad de señal incorporando en el trabajo el equilibrio de carga entre canales. Hay que tener en cuenta también que si un AP se encuentra en el límite de congestión, este puede desasociar a algunos de sus clientes para volver a aumentar así su potencia de transmisión.

Este esquema propuesto por Abeyskera et al. es el esquema MinMax, donde el problema de la asociación de canales es tratado desde el punto de vista de los APs. Lo que intenta este algoritmo es minimizar la máxima utilización efectiva del canal en el AP con mayor carga.

Este algoritmo está propuesto para las redes con un esquema centralizado, esto es, sistemas WLAN administrados con coordinador central, es decir el motor de interferencias IME (*Interference Management Engine*) como en nuestro caso es la WLAN del campus, en este trabajo, más en concreto la de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares. Eligen un sistema centralizado porque el fin del algoritmo es la mejora de los factores del rendimiento como pueden ser el rendimiento global, el rendimiento mínimo y la equidad. La idea de su propuesta es la asignación del canal que maximice la función de utilidad. Algo a destacar de esta propuesta es que, dado que las redes WLAN operan en bandas sin licencia, se tienen en cuenta los APs incontrolables, esto es, los APs que pertenecen a otros dominios pero ocupan el mismo canal. Para ello lo que hace es que la función de utilidad está conectada directamente al rendimiento de los APs, de esta forma tenemos un enfoque más flexible y preciso para la optimización del sistema.

Esquema de asignación de canales controlado por la red

En esta propuesta, el IME, es decir el servidor de asignación de canales va recopilando información de canales y tráfico de los APs conectados al sistema administrado, estos APs son los APs gestionados. El IME calcula el canal casi óptimo para cada AP gestionado maximizando así el rendimiento, pero teniendo en cuenta todos los APs que operan en el entorno, esto es, los gestionados y los externos.

Para ello define una función de utilidad que representa la relación del rendimiento alcanzable de un AP a su carga de tráfico. El rendimiento alcanzable del AP- i administrado que opera en el canal CH- j se define como:

$$U_{(AP-i, CH-j)} = \frac{\min\left(T_{\text{occupy}}^{(CH-j)}, T_{\text{data}}^{(AP-i)}\right)}{T_{\text{data}}^{(AP-i)}}$$

Donde $T_{\text{occupy}}^{(CH-j)}$ denota el tiempo total que AP- i puede ocupar el medio inalámbrico en una unidad de tiempo si el canal CH- j está asignado a AP- i , y $T_{\text{data}}^{(AP-i)}$ indica el tiempo total necesario para enviar o recibir datos en el BSS (*Basic Service Set*), conjunto de servicio básico, de AP- i en una unidad de tiempo. Tenga en cuenta que $\min(a, b) = a$, si $a \leq b$. Cuanto más alta sea la $U_{(AP-i, CH-j)} (\leq 1)$, mayor será el rendimiento del AP- i .

Una vez que se han calculado las utilidades de todos los APs gestionados, el IME determina cuál es el canal óptimo que debe asignar. En nuestro caso, el IME determinará los canales de los APs que maximicen la suma de la función de utilidad, ya que nuestro objetivo va a ser asignar canales que maximicen el rendimiento general del sistema y el rendimiento mínimo.

El algoritmo AIIM consiste en ir eligiendo al azar los APs y viendo que canal maximiza su función de utilidad y asignándole temporalmente dicho canal a cada AP, en caso de que con varios canales la utilidad del AP fuera la misma, se escogería uno al azar. El siguiente paso será coger el AP con el menor valor de la función de utilidad y recalculando la utilidad del AP en cada canal, reasignando el canal donde el AP obtenga un mayor valor de su función de utilidad, realizándolo un número determinado de veces o hasta que todas las funciones de utilidad de los distintos APs valgan 1 (utilidad máxima de un AP). Siempre que haya varios candidatos a ser elegidos, este será escogido de forma aleatoria. Para que el nuevo canal sea el asignado al AP, el valor de la suma de las utilidades de todos los APs no puede verse degradado, sino, se quedará con el canal que tenía asignado.

El esquema del algoritmo está representado en la siguiente figura, donde se propone un algoritmo heurístico para lograr una asignación de canales casi óptima. Este esquema es el siguiente:

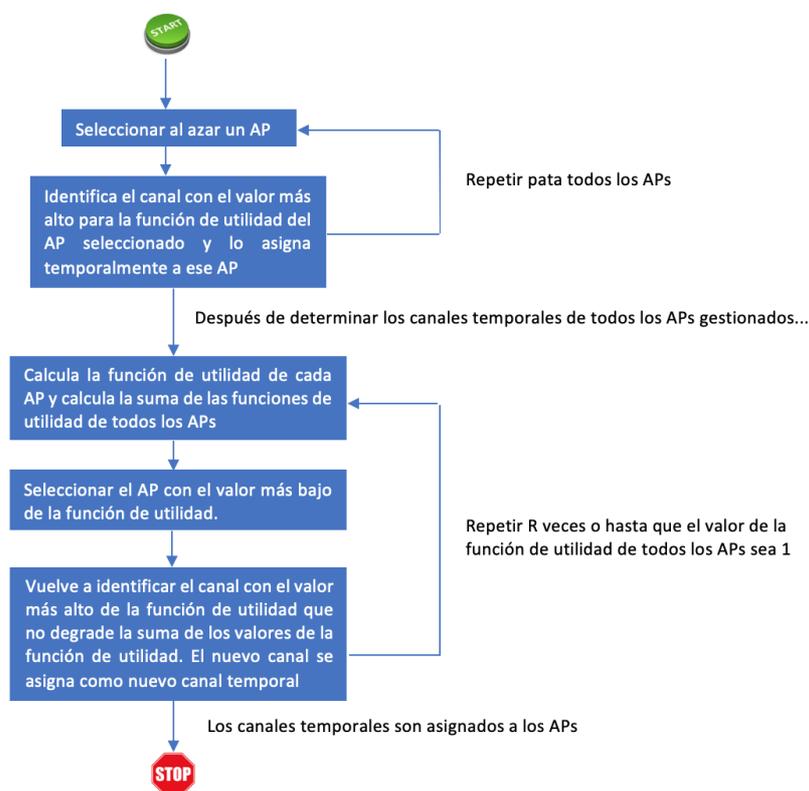


Figura 17: Esquema general AIIM

El conseguir que las funciones de utilidad de todos los APs lleguen a valer 1 es algo muy complejo, sería lo ideal, pero en caso de conseguirlo, llevaría mucho tiempo de ejecución del script y dicho tiempo no garantiza que vaya a suceder, por lo que si queremos lograr que las funciones de utilidad de todos los APs valgan 1, podríamos caer en un bucle infinito. Por tanto, en la implementación realizada obviaremos esa parte y realizaremos un bucle de R veces.

Implementación del esquema de asignación de canales controlado por la red

Para explicar el algoritmo más a fondo lo dividiremos en dos partes claramente diferenciadas. Por un lado hasta la primera asociación temporal de canales y por otro lado, desde la primera asociación hasta el final.

- La primera parte de las diferenciadas en el esquema principal del algoritmo es la siguiente:

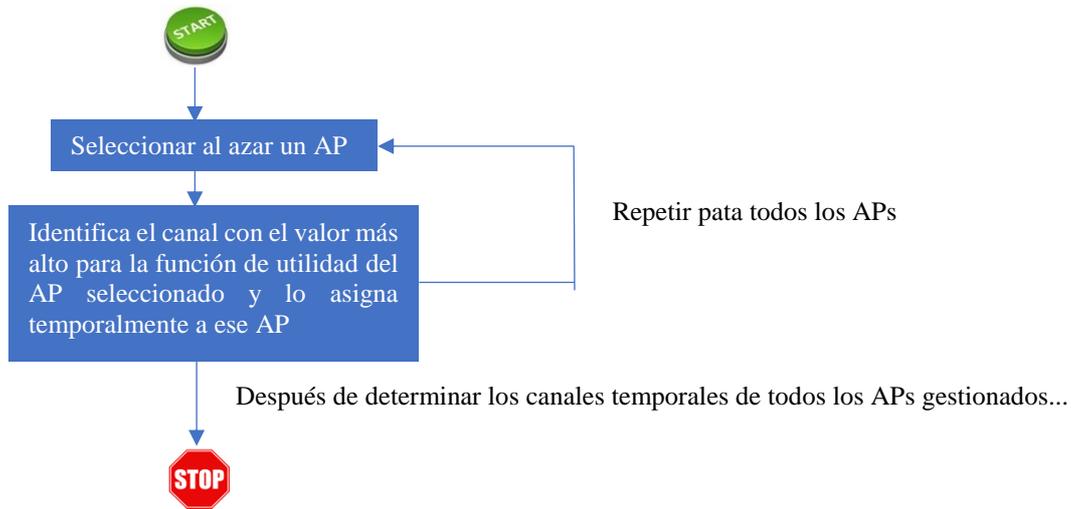


Figura 18: Esquema primera parte AIIM

El esquema más detallado de esta primera parte que se ha empleado para la implementación del código es el siguiente:

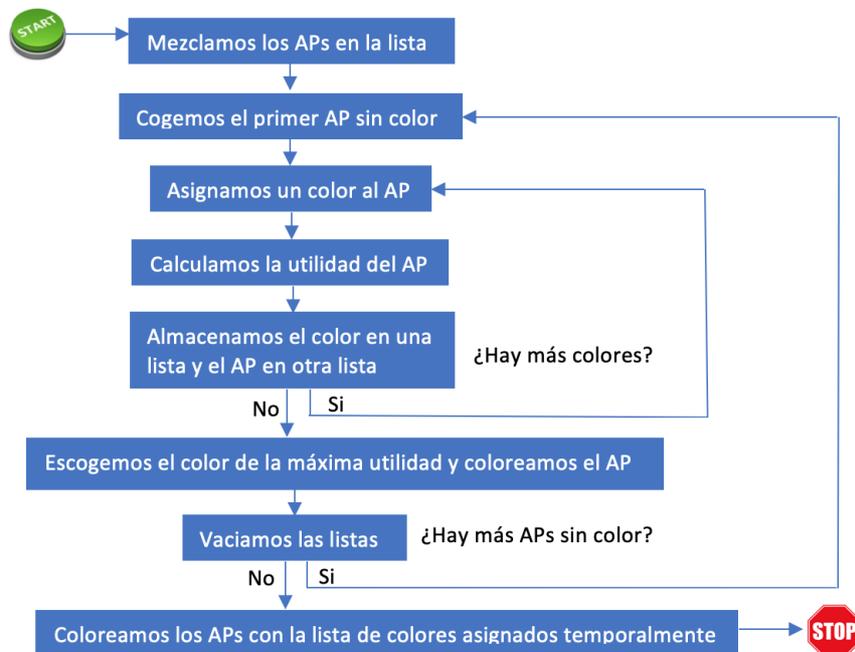


Figura 19: Esquema de implementación primera parte AIIM

- La segunda parte de las diferenciadas en el esquema principal del algoritmo es la siguiente:

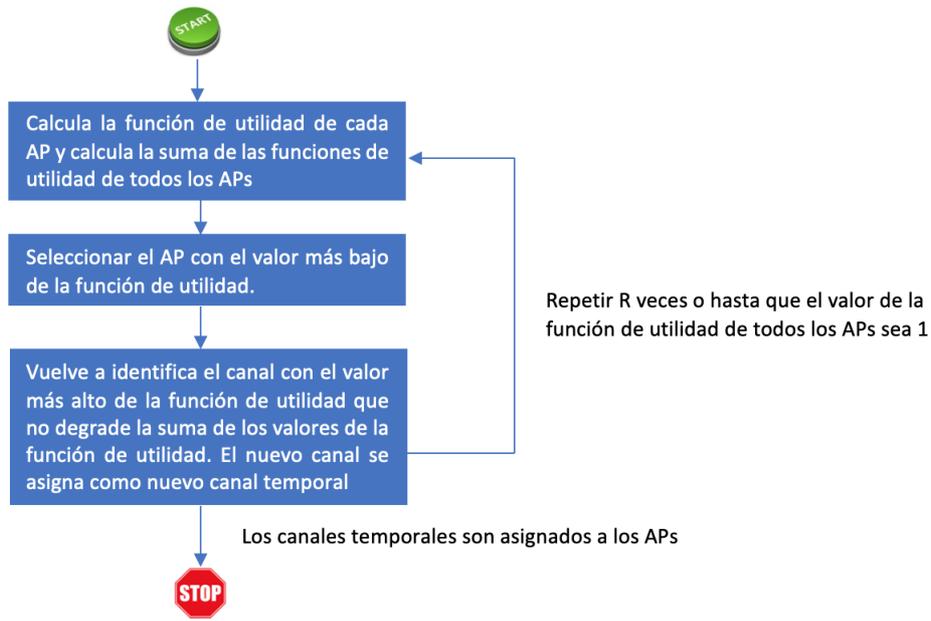


Figura 20: Esquema segunda parte AIIM

El esquema más detallado de esta segunda parte que se ha empleado para la implementación del código es el siguiente:

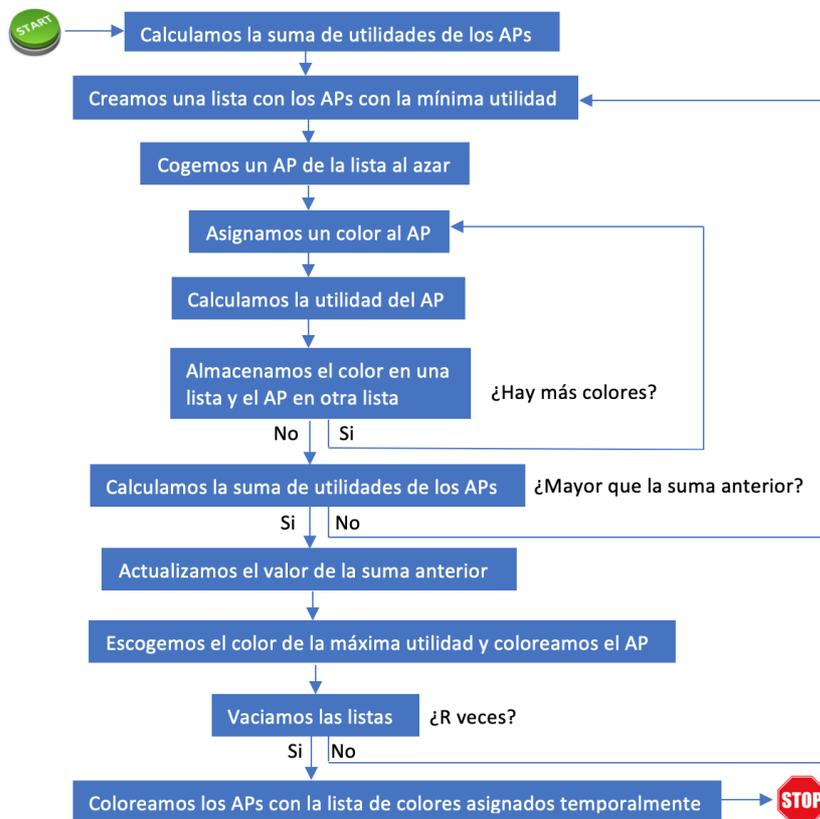


Figura 21: Esquema de implementación segunda parte AIIM

El esquema detallado completo empleado para la implementación del algoritmo de asignación de canales propuesto por Abeysekera et al. en [10] es el siguiente:

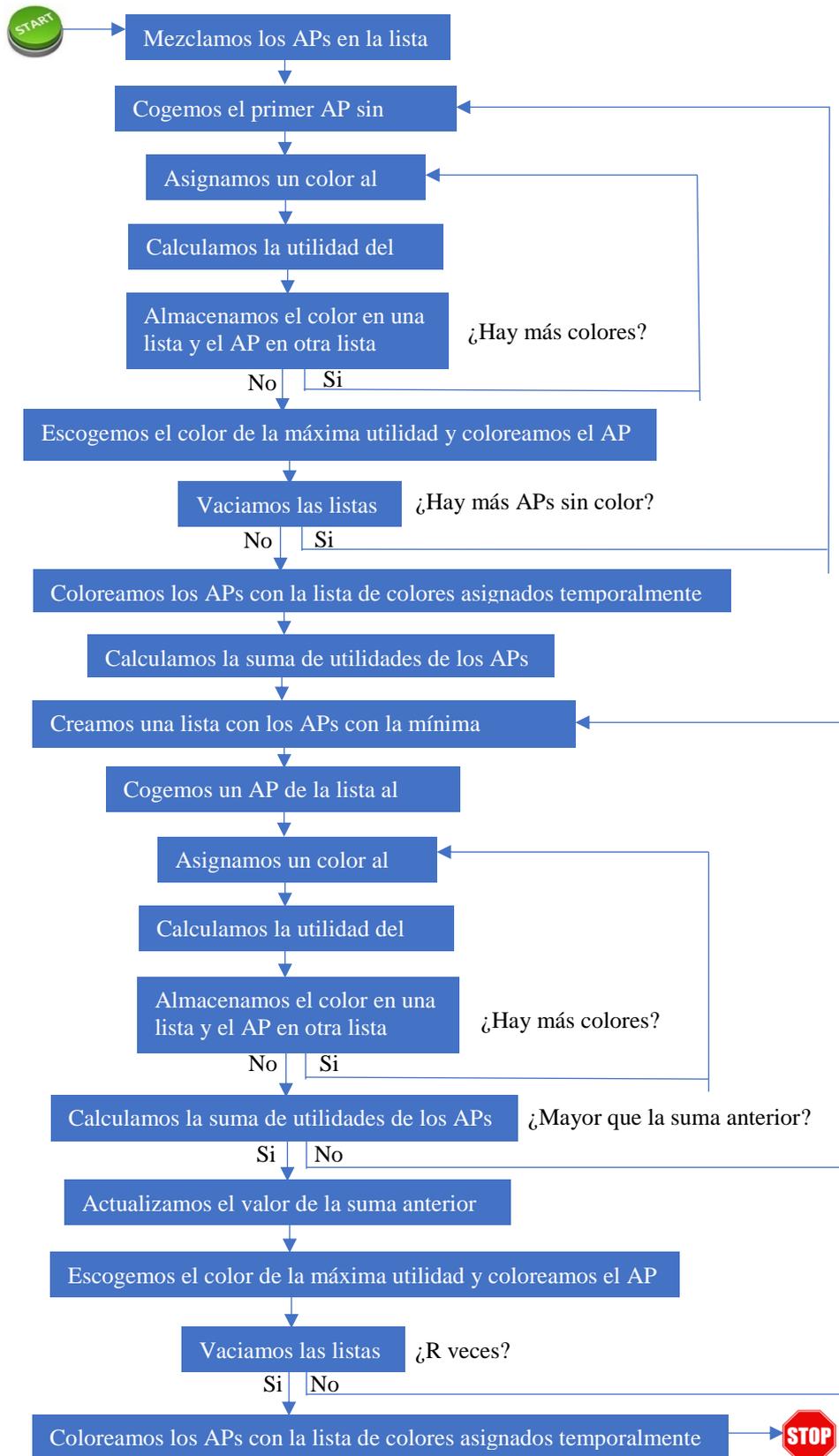


Figura 22: Esquema completo de implementación AIIM

HZNA

La propuesta HZNA [9] trata el problema de la asignación de canales para redes WLAN como un problema de coloración de grafos. Este problema dice lo siguiente:

Supongamos que se nos da un $G = (V, E)$ simple, es decir, un grafo que consiste en un conjunto de vértices V y un conjunto de bordes E que conectan los vértices, de modo que los bucles (bordes que conectan el vértice a sí mismo) y múltiples bordes entre los vértices no están permitidos.

Una coloración de vértice de G es un mapa: $V(G) \rightarrow F$, donde F es un conjunto de colores. Se dice que un coloreado es admisible si $C(V_i) \neq C(V_j)$ para todos los V_i y V_j adyacentes (es decir, para aquellos vértices unidos por un borde). Llamamos una minimización de coloración admisible una coloración óptima. El número de colores utilizados por la coloración óptima $|C(V)|$ se denomina número cromático del gráfico. Podemos definir dos conceptos básicos de este problema, estos son:

- **Grafos de interferencia:**

Dada una colección de APs $\{v_i\}$, procedentes de un grafo de interferencia de la siguiente manera $G = (V_G, E_G)$. El conjunto de vértices V_G se identifica con el conjunto de APs $\{v_i\}$, mientras que el conjunto de bordes E_G se construye como la unión de los pares de vértices $\{v_k, v_l\}$ que interferirían con el tráfico de la relación del otro y se los debe asignar el mismo canal. Finalmente, F es el conjunto de colores (canales) disponibles para la asignación de los APs. El conjunto de colores depende de la tecnología y la legislación, en la mayoría de los países europeos es $F = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13\}$ para tecnologías WLAN, cuyo subconjunto $F' = \{1,6,11\}$ corresponde a los canales que no se superponen como ya se explicó anteriormente. Un grafo de interferencia podría ser el siguiente:

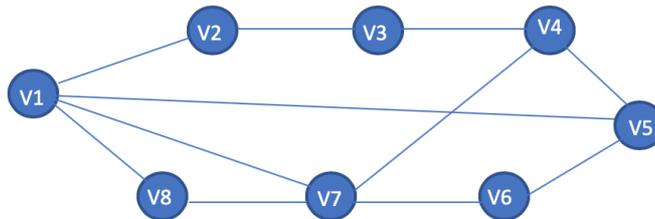


Figura 23: Esquema de un grafo ejemplo

- **Matriz de adyacencia:**

Supongamos que G es un grafo con m vértices, y supongamos que los vértices han sido ordenados, por ejemplo, v_i, v_j, \dots, v_m . Luego, la matriz de adyacencia $A(G) = [a_{ij}]$ del gráfico G es la matriz $m \times m$ donde a_{ij} toma el valor 1 si $\{v_i, v_j\}$ forman un borde E_G y el valor 0 si no lo forman. La matriz de adyacencia A del grafo G depende del ordenamiento de los vértices, pero un orden distinto simplemente lleva a una matriz de adyacencia distinta pero que pueden ser iguales intercambiando filas y columnas. La matriz de adyacencia correspondiente al grafo anterior sería la siguiente:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Algoritmo de combinación de vértices (VMA) propuesto

El problema de la coloración es algo muy estudiado para el que existen múltiples algoritmos, pero estos autores deciden crear un algoritmo más, este algoritmo es, a diferencia de otros, un algoritmo determinista, ya que lo consideran necesario dado que los puntos de acceso deben coincidir en los canales asignados. La heurística que utiliza VMA es encontrar el vértice de mayor grado, esto es, con el mayor número de vecinos de borde, para colorearlo siguiendo el problema de coloración, y así sucesivamente, eligiendo únicamente los vértices incoloros por orden decreciente de vecinos.

El algoritmo propuesto, HZNA, para la asignación de canales es el siguiente:

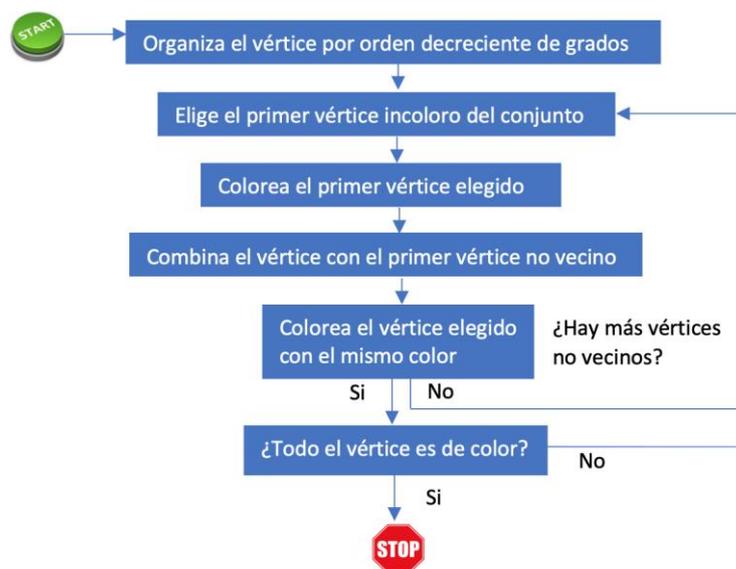


Figura 24: Esquema general HZNA

Implementación del algoritmo de combinación de vértices (VMA)

El esquema detallado completo empleado para la implementación del algoritmo de asignación de canales HZNA para 3 canales es el siguiente:

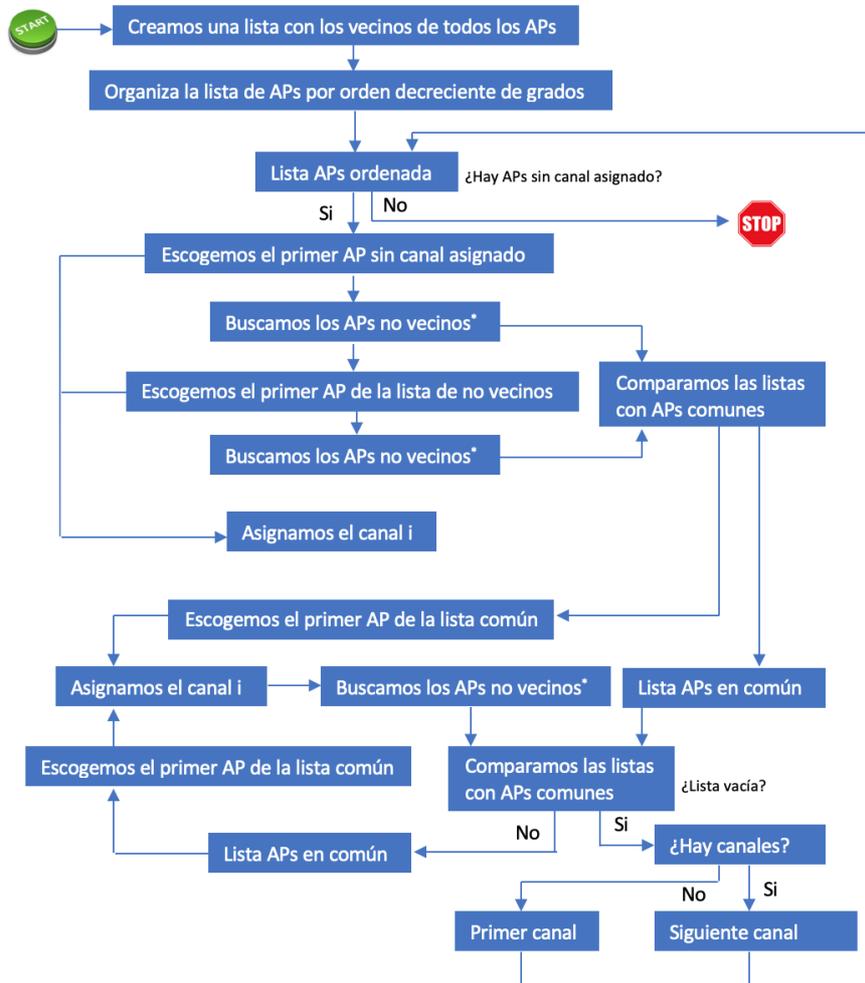


Figura 25: Esquema de implementación HZNA 3 canales

*La lista de no vecinos que buscamos únicamente incluye los APs que no tienen un canal asignado.

El esquema detallado completo empleado para la implementación del algoritmo de asignación de canales HZNA para 11 canales es el siguiente:

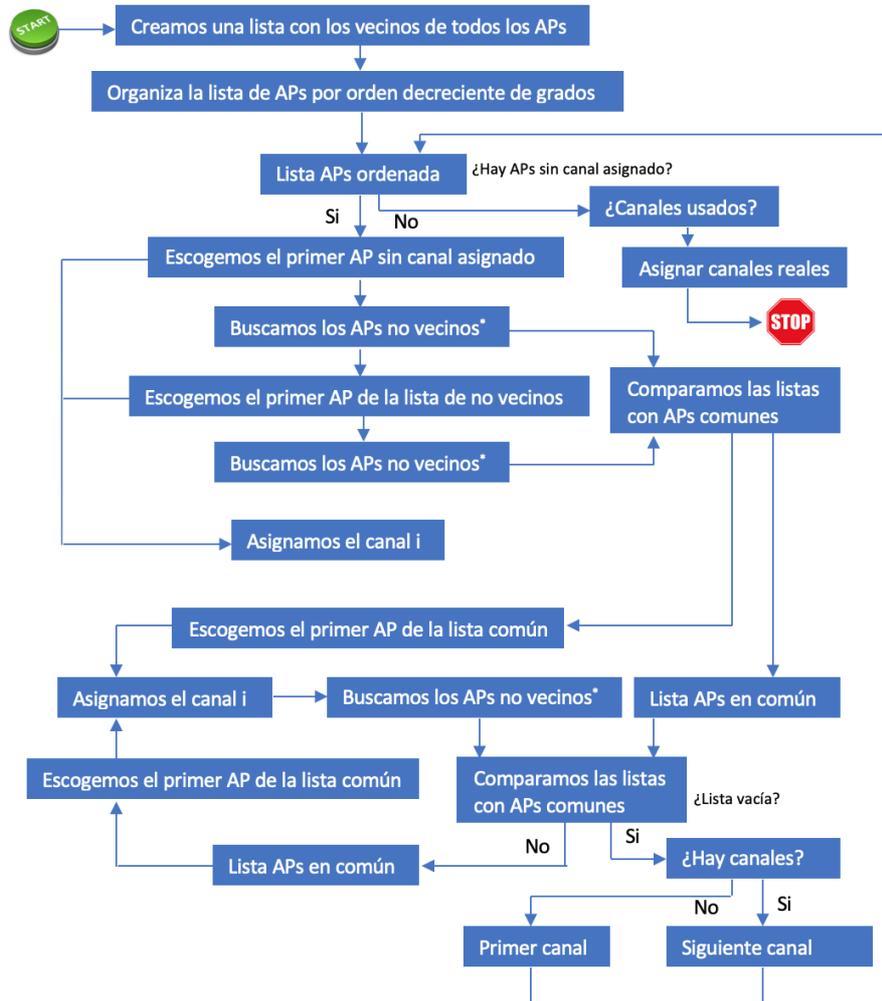


Figura 26: Esquema de implementación HZNA 11 canales

*La lista de no vecinos que buscamos únicamente incluye los APs que no tienen un canal asignado.

Un ejemplo para poder entender mejor el funcionamiento de dicho algoritmo puede ser el siguiente:

- Dado un grafo:

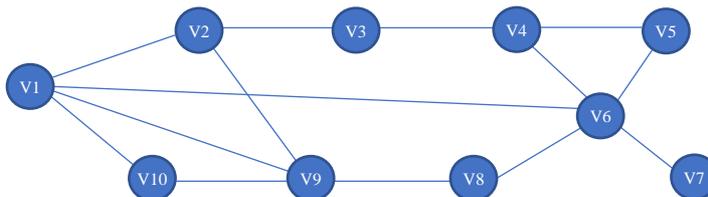


Figura 27: Grafo ejemplo HZNA inicial

- Vemos cuantos vecinos tiene cada vértice a través de la matriz de adyacencia:

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	
$A =$	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	V1 = 4 vecinos
	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	V2 = 3 vecinos
	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	V3 = 2 vecinos
	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	V4 = 3 vecinos
	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	V5 = 2 vecinos
	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	V6 = 5 vecinos
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	V7 = 1 vecinos
	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	V8 = 2 vecinos
	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	V9 = 4 vecinos
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	V10 = 2 vecinos

- Organizamos el vértice por orden decreciente de grados. El vértice con el grado más alto es V6, luego V1 y V9 con 4 grados, seguidos por V2 y V4 con grado 3 cada uno, con grado 2 tenemos a V3, V5, V8 y V10, y por último, V7 con grado 1. Una posible ordenación es: {V6, V1, V9, V2, V4, V3, V5, V8, V10, V7}

- Escogemos el primer vértice de la lista: V6 y lo coloreamos con el primer color.

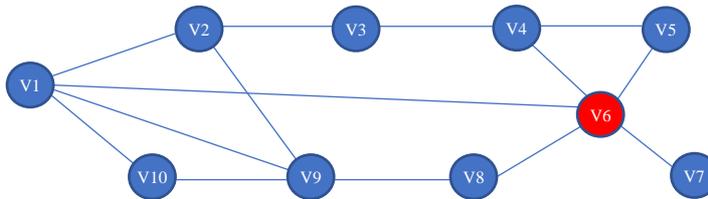


Figura 28: Grafo ejemplo HZNA primer paso

- Combina con el primer vértice no vecino, en este caso el vértice no es vecino con V6 es V9. Así que la fusión V6 en V9. Luego V6 mismo color con V9.

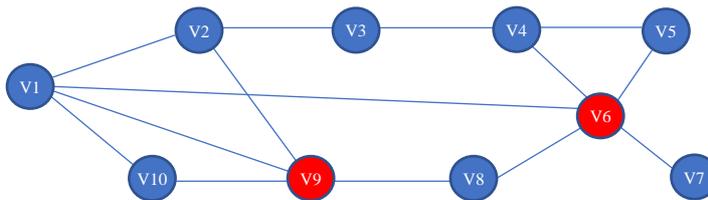


Figura 29: Grafo ejemplo HZNA segundo paso

- Busca los vértices no vecinos en común de V6 y V9, en este caso, únicamente es V3 y lo colorea en el mismo color.

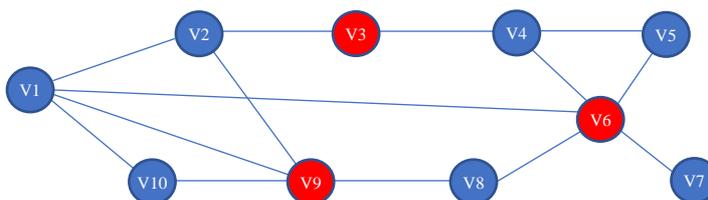


Figura 30: Grafo ejemplo HZNA cuarto paso

- No hay más vértices no vecinos en común por lo que pasamos al siguiente vértice de la lista ordenada. V1 en este caso.

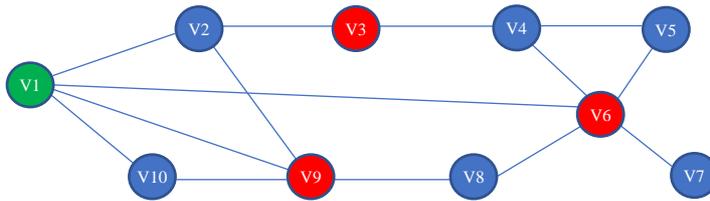


Figura 31: Grafo ejemplo HZNA cuarto paso

- Combina con el primer vértice no vecino sin canal asignado, en este caso el vértice no es vecino con V1 es V4. Así V1 mismo color con V4.

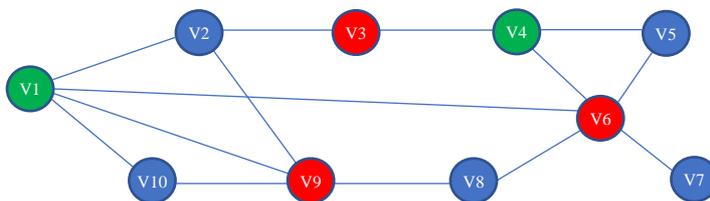


Figura 32: Grafo ejemplo HZNA quinto paso

- Busca los vértices no vecinos en común de V1 y V4, en este caso, son el V7 y V8, pero el V8 está antes en la lista, por lo que lo colorea en el mismo color.

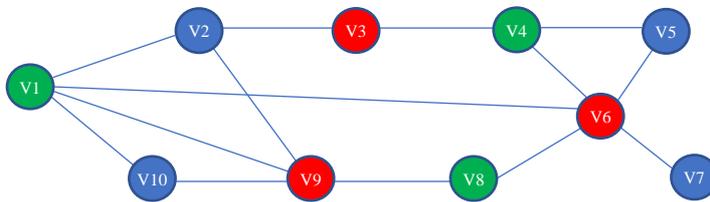


Figura 33: Grafo ejemplo HZNA sexto paso

- Busca los vértices no vecinos en común de V1, V4 y V8 en este caso, únicamente el V7, por lo que lo colorea en el mismo color.

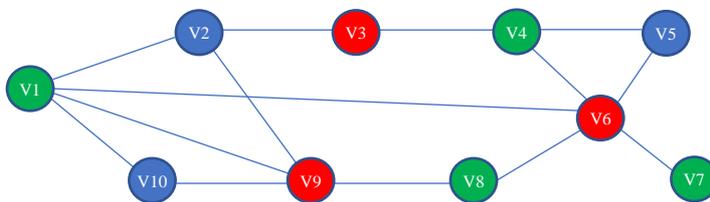


Figura 34: Grafo ejemplo HZNA séptimo paso

- No hay más vértices no vecinos en común por lo que pasamos al siguiente vértice de la lista ordenada. V2 en este caso.

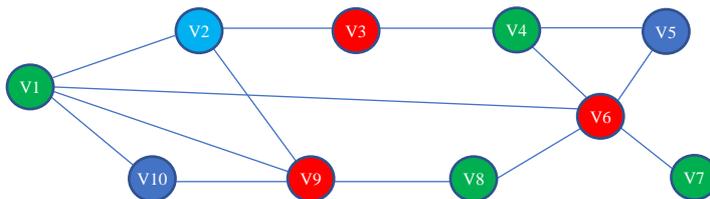


Figura 35: Grafo ejemplo HZNA octavo paso

- Combina con el primer vértice no vecino sin canal asignado, en este caso el vértice no es vecino con V2 es V5. Así V2 mismo color con V5.

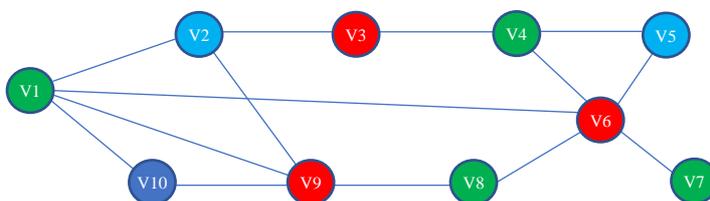


Figura 36: Grafo ejemplo HZNA noveno paso

- Busca los vértices no vecinos en común de V6 y V9, en este caso, únicamente es V3 y lo colorea en el mismo color.

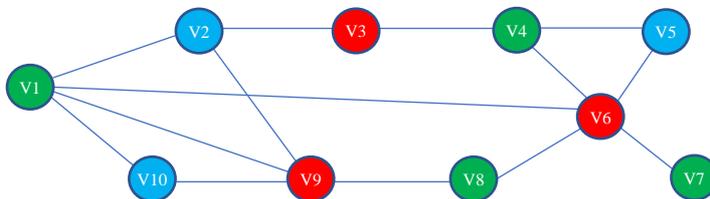


Figura 37: Grafo ejemplo HZNA décimo paso

- Como ya no quedan vértices incoloros, ya tendríamos la coloración final del grafo, siendo esta la siguiente:

$$\begin{aligned} C(v_3, v_6, v_9) &= 1 \\ C(v_1, v_4, v_7, v_8) &= 2 \\ C(v_2, v_5, v_{10}) &= 3 \end{aligned}$$

**En caso de que se agotasen los canales a asignar y hubiera algún vecino sin un canal asignado, volveríamos a utilizar el primer canal de la lista.

***Si trabajamos con 11 o con 13 canales, el objetivo del algoritmo es emplear el menor número de canales posibles para colorear el grafo.

Mejora del algoritmo de asignación de canales AIIM

En el algoritmo propuesto por Abeyssekera et al. [9], para realizar la asignación de canales tiene en cuenta únicamente la interferencia que se causa entre los distintos APs en el grafo que tienen algún cliente asignado, por lo que una propuesta interesante sería tener también en cuenta la interferencia que crean los distintos clientes, para ello lo que hacemos es realizar el cálculo de la utilidad teniendo en cuenta los *cluster* en lugar de los APs solamente. Gracias a ello se obtienen mejores rendimientos empleando el mismo algoritmo sobre un mismo grafo. Un ejemplo para entender mejor esta mejora podría ser el siguiente:

- Dado una red Wi-Fi reducida donde únicamente vamos a tener cinco APs, en la que se verán representados los distintos APs con sus clientes asociados, coloreados cada uno en un color para diferenciarlos, este coloreado no tiene nada que ver con la asignación de canales:

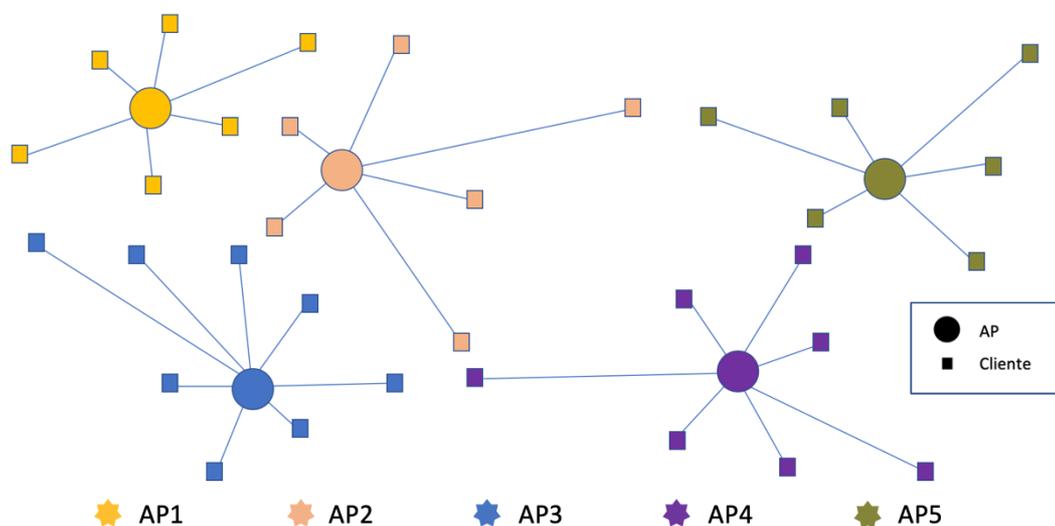


Figura 38: Grafo ejemplo APs y clientes AIIM

- Para el algoritmo original AIIM, el escenario empleado para la asignación de canales teniendo en cuenta su interferencia sería el siguiente:

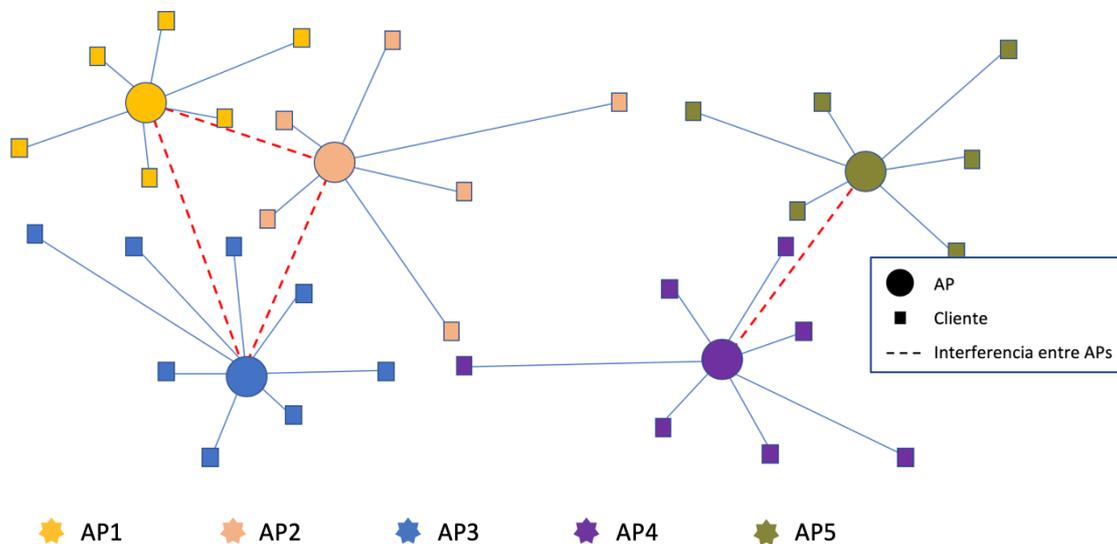


Figura 39: Grafo ejemplo APs y clientes AIIM con interferencias entre APs

· Para el algoritmo mejorado AIIM (teniendo en cuenta el *cluster* completo), el escenario empleado para la asignación de canales teniendo en cuenta su interferencia sería el siguiente:

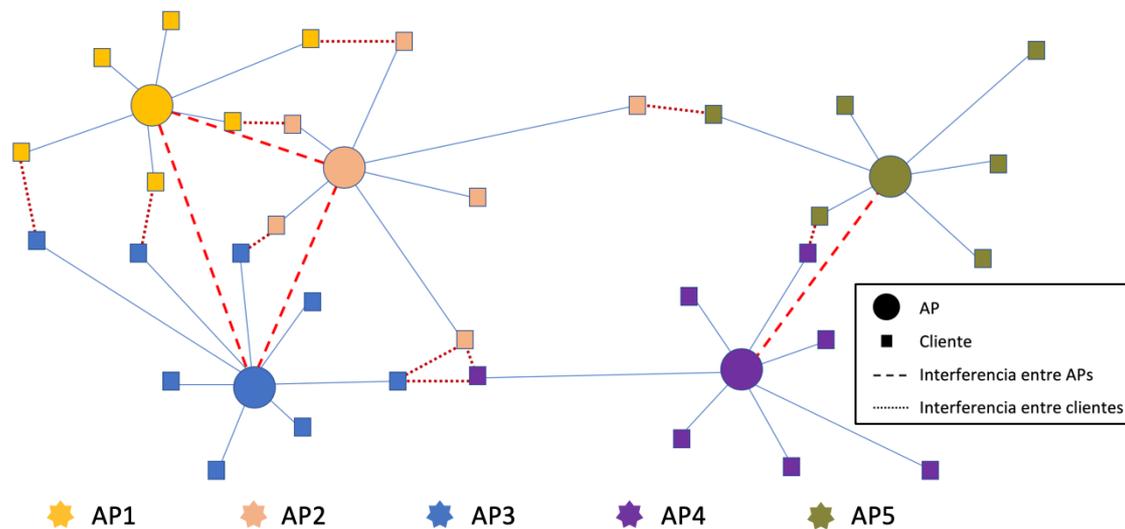


Figura 40: Grafo ejemplo APs y clientes AIIM con interferencias cluster

Como podemos ver, la diferencia entre los dos escenarios es únicamente la interferencia que crean unos clientes sobre otros, pero esto provoca que algunos APs que antes no interferían entre sí ahora sí que interfieran debido a que lo que se tiene en cuenta en el segundo escenario es la interferencia del *cluster* completo, esto es, la interferencia de clientes y APs.

En el primer escenario, que corresponde con la versión original del algoritmo propuesto por Abeyskera podemos ver que los APs que crean interferencias sobre otros son:

- AP1 interfiere con AP2 y AP3.
- AP2 interfiere con AP1 y AP3.
- AP3 interfiere con AP1 y AP2.
- AP4 interfiere con AP5.
- AP5 interfiere con AP4.

En el segundo escenario, que corresponde con la versión mejorada del algoritmo AIIM podemos ver que los cluster que crean interferencias con otros son:

- El cluster de AP1 interfiere con los cluster de AP2 y AP3.
- El cluster de AP2 interfiere con los cluster de AP1, AP3, AP4 y AP5.
- El cluster de AP3 interfiere con los cluster de AP1, AP2 y AP4.
- El cluster de AP4 interfiere con los cluster de AP2, AP3 y AP5.
- El cluster de AP5 interfiere con los cluster de AP2 y AP4.

Gracias a esto, conseguimos que, en caso de que fuera posible, algunos APs que tras la asignación de canales podrían estar asignados a un mismo canal y, por tanto, creando ciertas interferencias sobre otros APs ahora tras tener en cuenta la utilidad de todo el cluster, puedan estar estos APs con canales distintos asignados evitando así muchas de las interferencias cocanales que existían tras la asignación de canales AIIM propuesta originalmente. Por tanto, en resumen, con la mejora lo que conseguimos es que teniendo en cuenta el cluster completo podemos evitar una posible interferencia cocanal.

Experimentos y resultados

Para la realización de los experimentos es importante también describir las distintas herramientas utilizadas para conseguir realizar el trabajo, el modelado que se ha utilizado, los distintos escenarios que se han empleado realizar la comprobación del funcionamiento de los algoritmos para su posterior comparación entre ellos y algunos otros algoritmos como *random* para demostrar que tienen cierto sentido estos resultados que se han obtenido.

Herramientas utilizadas

Dentro de las herramientas utilizadas para realizar el presente trabajo cabe destacar las siguientes con un pequeño resumen y las versiones que se han usado:

- **Python [14]:** Python es el lenguaje de programación que se ha utilizado para la implementación de los distintos algoritmos de asignación de canales. La versión del lenguaje que se ha utilizado es Python 2.7.
- **Networkx [15]:** Networkx es un paquete de Python que se ha utilizado para la creación, manipulación y estudio de la estructura. La versión que se ha instalado de este paquete es la v1.11.
- **Numpy [16]:** Numpy es un paquete de Python que se ha utilizado para la computación científica. La versión que se ha instalado de este paquete es la v1.15.4.
- **Anaconda navigator [17]:** Anaconda navigator es el entorno de gestión que se ha utilizado donde se pueden instalar los distintos paquetes o librerías de Python, gestionar las diferentes aplicaciones para desarrollo y consulta de las distintas documentaciones, tutoriales y foros. La versión utilizada de este entorno es la v1.9.6.
- **Spyder [18]:** Spyder es el entorno de desarrollo científico de Python que se ha utilizado para la implementación de los distintos algoritmos de asignación de canales. La versión que se ha utilizado de este software es la v3.3.2.

Los logos que representan las distintas herramientas que hemos avanzado son los siguientes:



Figura 41: Logos herramientas utilizadas

Finalmente procederemos a describir de forma más detallada el lenguaje de programación, los paquetes más importantes y las herramientas que se han utilizado.

Python

Es un lenguaje de programación multiparadigma, esto es, permite la programación funcional, la programación imperativa y la programación orientada a objetos. Es un lenguaje de código abierto, multiplataforma y preparado para desarrollos de distintas aplicaciones. Una de las cosas que diferencian a Python de otros lenguajes es que no es necesario compilar el código para poder llevar a cabo su ejecución, únicamente es necesario un intérprete, por ello, se dice que es un lenguaje interpretado. Esto provoca una mayor rapidez de desarrollo pero por el contrario tiene una menor velocidad.

Al contrario que otros lenguajes de programación, este está basado en la indentación, lo que facilita la legibilidad de los programas implementados con Python, ya que evitamos las llaves que son necesarias en muchos lenguajes. Esto a su vez provoca que los programadores adopten las mismas notaciones y los programas tengan un aspecto muy similar.

Otra de las cosas interesantes de este lenguaje es la multitud de funciones de las que dispone para no tener que realizar desde cero muchas de las tareas comunes, además de las librerías que podemos importar en los programas creados para tratar temas más específicos.

Python es un lenguaje que utiliza tipado dinámico, esto es, que una misma variable puede adoptar varios tipos en función de su contenido, pudiendo cambiar el tipo a lo largo de la ejecución del programa.

Existen dos versiones de Python, una primera versión que se suele tratar como Python 2 y una evolución llamada Python 3, los programas escritos en una versión no son válidos para la otra, ya que una de las diferencias es que hay alguna modificación en la sintaxis, por lo que si queremos migrar de una versión a otra es necesario reescribir el código aunque tengan la misma extensión (*.py), que es común a ambas versiones.

NumPy (Numeric Python)

Es un paquete de código abierto fundamental para la computación científica con Python. Algunas de las cosas que contiene este paquete son:

- Un potente objeto de array N-Dimensional.
- Funciones de radiodifusión sofisticadas.
- Herramientas de integración de C/C++ y código Fortran.
- La utilidad de álgebra lineal, transformada de Fourier y capacidad de trabajar con números aleatorios.

NetworkX

Es un paquete de Python para la creación, manipulación y estudio de la estructura, dinámica y funciones de redes complejas. Algunas de las características que ofrece este paquete son:

- Herramientas para el estudio de la estructura de infraestructura de redes.
- Interfaz de programación estándar e implementación gráfica que sea adecuada para múltiples aplicaciones.
- Entorno de desarrollo rápido para proyectos colaborativos.
- Interfaz con algoritmos numéricos existentes y código escrito en C/C++ y Fortran.
- Capacidad de trabajar con grandes conjuntos de datos no estándar.

Este paquete permite cargar y almacenar redes tanto en formato estándar como no estándar, generar varios tipos de redes clásicas y aleatorias, analizar estructuras de red, construir modelos de red, diseñar nuevos algoritmos de red, dibujar redes, ...

Anaconda Navigator

Es una aplicación de escritorio de interfaz gráfica para el usuario (GUI) que se incluye en la distribución de Anaconda y permite iniciar aplicaciones y administrar paquetes, entornos y canales de Conda de una forma gráfica y sin utilizar comandos en el terminal de Conda. Navigator puede buscar paquetes en Anaconda *cloud* o en los repositorios locales de Anaconda y está disponible para varios sistemas operativos, en este caso, ha sido instalado en MacOS X.

Una de las cosas interesantes que nos ofrece este software es la instalación de versiones específicas de algunos paquetes adaptando las versiones del resto de paquetes dependientes para que todo funcione correctamente o si necesitamos instalar un paquete nos instale también sus dependencias automáticamente.

Algunas de las aplicaciones que están disponibles en Anaconda Navigator son:

- **JupyterLab:** Es un entorno extensible para la computación interactiva y reproducible, basado en *Jupyter Notebook* y *Architecture*.
- **Jupyter Notebook:** Es un entorno de *Notebook* interactivo basado en Web. Permite editar y ejecutar documentos legibles por personas mientras describe el análisis de datos.
- **Qt-Console:** Es una interfaz gráfica de usuario PyQt que soporta figuras en línea, edición de líneas múltiples adecuada con resaltado de sintaxis, *calltips* gráficos, ...
- **Spyder:** Es un entorno de desarrollo científico de Python con edición avanzada, pruebas interactivas, depuración y características de introspección.
- **Glueviz:** es una herramienta de visualización de datos multidimensionales entre archivos. Explora las relaciones entre los conjuntos de datos relacionados.
- **Orange 3:** Es un framework de minería de datos basado en componentes. Permite la visualización y análisis de datos para principiantes y expertos y tiene flujos de trabajo interactivos con una gran caja de herramientas.
- **RStudio:** Es un conjunto de herramientas integradas diseñadas para que el programador sea más productivo con R. Para ello incluye cosas esenciales de R y notebooks.
- **VS Code:** Es un editor de código simplificado con soporte para operaciones de desarrollo como depuración, ejecución de tareas y control de visión.

Spyder (Scientific Python Development Environment)

Es un potente entorno científico escrito en Python que ofrece una amplia combinación de funcionalidades como:

- **Editor:** Permite trabajar de manera eficiente en varios lenguajes y además lleva integrado un navegador de funciones y clases, herramientas de análisis de código, sugerencias de completar código automáticamente, permite también dividir el editor en varias ventanas tanto verticales como horizontales, lo que nos ayuda a tener más a mano funciones o fragmentos de código que necesitamos.
- **Consola IPython:** Se pueden utilizar tantas consolas como necesitemos y además permite también ejecutar código por línea, celda o archivos, por lo que es otra de las cosas interesantes, ya que nos permite realizar pequeñas pruebas o comprobaciones sin necesidad de crear scripts.
- **Explorador de variables:** Permite interactuar y modificar variables en tiempo real, también permite consultar el valor de las variables en todo momento, lo cual puede ser realmente útil para saber si el programa está funcionando de forma correcta. También permite realizar histogramas o series de tiempo y muchas funcionalidades más.
- **Perfilador:** Permite encontrar y eliminar cuellos de botella para mejorar el rendimiento del código.
- **Depurador:** Permite el análisis y ejecución del código paso a paso de forma interactiva, esto es interesante ya que podemos ver el comportamiento de algunas funciones o variables tras la ejecución de líneas de código concretas y a su vez también permite detectar errores de código.
- **Ayuda:** Permite consultar la documentación sobre funciones, métodos, objetos, ... concretos sin necesidad de buscarla a través de Internet, esto realmente ahorra mucho tiempo y permite que dentro del mismo entorno de desarrollo resolvamos la duda sobre su funcionamiento, parámetros de entrada o salida, ...

Otras cosas interesantes son los *plugins* de terceros que nos permite instalar para ampliar las funcionalidades, estos son:

- **Spyder Notebook:** Permite interactuar y editar con Jupiter Notebook dentro de Spyder.
- **Spyder Terminal:** Permite un control total de la *Bash* y *cmd* Shell dentro de Spyder.
- **Spyder unittest:** Permite ejecutar test de prueba y ver los resultados dentro de Spyder.
- **Spyder Reports:** Permite redactar documentos basados en datos con Spyder.

Modelado mediante grafos multicapa

El modelado mediante grafos multicapa, se utiliza para conseguir modelar y ver aspectos más complejos de las redes inalámbricas con mayor facilidad. Los grafos que se han utilizado se componen de dos capas: la capa de conectividad (Grafo I) y la capa de interferencias (Grafo G), y a su vez, ambas capas se componen de puntos de acceso (APs) y Dispositivos inalámbricos (WDs, *Wireless Devices*). Gracias a esta potente herramienta logramos adaptar el problema de la asignación de canales, o lo que es lo mismo, de asignación de frecuencias a un problema de coloreado de grafos. El problema de coloreado de grafos consiste en asignar unas frecuencias concretas para que cada AP trabaje en ellas, a estas frecuencias concretas se las denomina canales, como se explicó anteriormente, esto se hace para reducir lo máximo posible las interferencias que se crean sin una asignación óptima. Trabajaremos con trece canales cada uno de ellos representado por un color y lo de lo que se trata es de asignar un color a cada AP. Un ejemplo en el que se trabaja con trece canales pero ubicando todos los APs en cuatro canales. Un coloreado de este tipo podría ser el siguiente:

- Dado el siguiente esquema con la ubicación de los distintos APs que componen la red:



Figura 42: Grafo ejemplo ubicación de APs

- Una posible coloración empleando cuatro canales podría ser la siguiente:

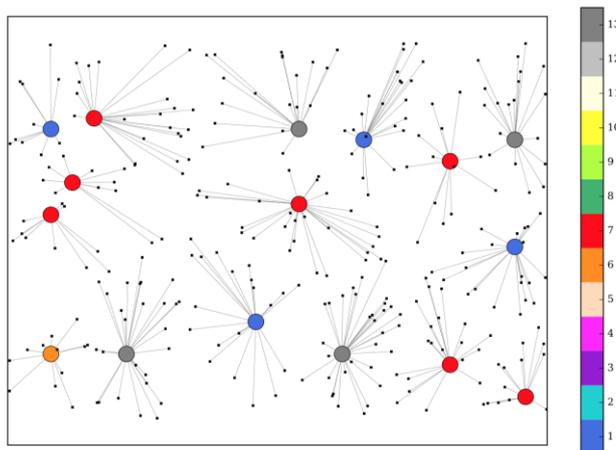


Figura 43: Ejemplo de grafo coloreado

Aquí se puede comprobar como la asignación de canales ha sido la siguiente, teniendo en cuenta que solo se han utilizado cuatro canales, quedando, por tanto, los canales 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11 y 12 sin ningún AP trabajando en ellos y los canales no solapados quedarían con la siguiente asignación:

- **Canal 1** (frecuencia de 2.412 GHz): AP1, AP4, AP10 y AP13.
- **Canal 6** (frecuencia de 2.437 GHz): AP11.
- **Canal 7** (frecuencia de 2.442 GHz): AP2, AP5, AP7, AP8, AP9, AP16 y AP17.
- **Canal 13** (frecuencia de 2.472 GHz): AP3, AP6, AP12 y AP15.

Para poder tratar este problema y llevar a cabo una posible solución, es conveniente definir cuatro conceptos fundamentales como son:

- **Grafo G:** El grafo G es el grafo de conectividad, también conocido como Grafo de Vecinos en la Red (NNG, *Neighbors Network Graph*), este grafo se utiliza para saber los clientes que tiene cada AP, o lo que es lo mismo, a qué AP se conecta cada WD, también llamados clientes. En principio, cada cliente debe estar conectado al AP que mayor potencia de señal proporcione, por lo que en el modelado que se ha utilizado, cada cliente está asociado con el AP más cercano (estas conexiones las denominamos como bordes). Por tanto, las pérdidas de potencia van a estar relacionadas con la distancia entre el cliente y el AP. Un ejemplo de este tipo de grafos con 14 APs y 52 clientes sería el siguiente:

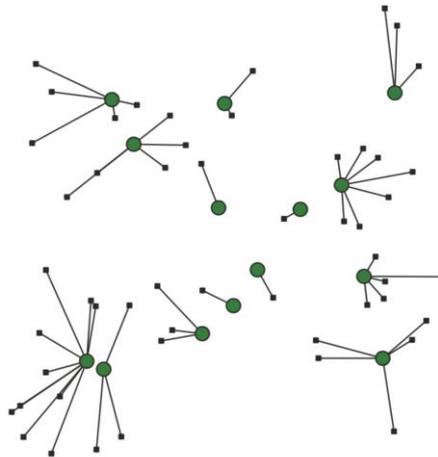


Figura 44: Ejemplo de grafo de conectividad

- **Grafo I:** El grafo I es el grafo de interferencia, también conocido como Grafo de Disco Unidad (UDG, *Unit Disk Graph*), este grafo se utiliza para saber que APs y clientes están “virtualmente conectados”, esto es, que interfieren entre sí haciendo uso de la señal de cada uno. Las uniones entre vértices (clientes o APs) son denominadas como bordes (no pudiendo haber conexiones entre clientes), que corresponden con las señales recibidas y cada una tiene un peso asignado que está relacionado con dicha potencia de señal, estas interferencias serán mayores cuando provengan de un AP. En estos grafos definimos dos tipos de bordes: interferencias y señal deseada. Estos bordes solo serán posibles si los vértices se encuentran dentro del área de cobertura (CA). Un ejemplo de este tipo de grafos con 14 APs y 52 clientes sería el siguiente:



Figura 45: Grafo de interferencias

- **Modelo de propagación:** El modelo de propagación, como se ha visto en el grafo de interferencias, trata de asignar unos pesos que se corresponden con la potencia de la señal. Para ello, lo primero que se hace es representar las pérdidas de potencia que hay desde la transmisión hasta la recepción. En nuestro modelo estas pérdidas (en dB) se calculan mediante la siguiente fórmula (para antenas situadas entre 1 y 2,5 m del suelo):

$$P_{loss} = 40 \log_{10} d + 20 \log_{10} f - 20 \log_{10} (h_t h_r)$$

donde d representa la distancia en metros entre las antenas transmisora y receptora cuyas alturas son h_t y h_r respectivamente y f es la frecuencia en la que operan, que dado que estamos ante una red Wi-Fi la consideramos constante con un valor de 2,4 GHz, por tanto obtenemos la siguiente expresión:

$$P_{loss} = 7.6 + 40 \log_{10} d - 20 \log_{10} (h_t h_r)$$

Para asignar los distintos pesos a los bordes, como vimos anteriormente, distinguimos entre los dos tipos de pesos:

- *Señal deseada:* Esta señal se produce entre el borde de un AP y un cliente y viceversa. El peso de estos bordes entre los vértices i y j ($S_{v_i \rightarrow v_j}$) se obtiene con la siguiente expresión:

$$S_{v_i \rightarrow v_j} = P_t + G_t + G_r - L - P_{loss}$$

donde P_t representa la potencia de transmisión (en dBm), las ganancias de las antenas transmisora y receptoras representadas con G_t y G_r respectivamente, L representa las pérdidas debidas a los obstáculos que interfieren en la señal y P_{loss} se calcula con la expresión anterior.

- *Señal de interferencia:* Para el cálculo de los pesos de los bordes entre los vértices i y j ($I_{v_i \rightarrow v_j}$) en este tipo de pérdidas debemos emplear la siguiente expresión:

$$I_{v_i \rightarrow v_j} = P_t + G_t + G_r - L - P_{loss} + \Psi + \eta (|c_i - c_j|)$$

donde todos los valores son los explicados anteriormente y están expresados en escala logarítmica. Los valores nuevos son Ψ y $\eta (|c_i - c_j|)$, donde el primero, Ψ , se corresponde con el índice de actividad, para los APs toma un valor de $\Psi=0.5$, mientras que para los clientes toma un valor de $\Psi=0.2$, y el segundo, $\eta (|c_i - c_j|)$, representa la interferencia cocanal entre los vértices i y j cuando se asignan los canales c_i y c_j . $|c_i - c_j|$, representa el número de canales que hay entre los canales utilizados.

La interferencia cocanal utilizada en el presente trabajo (que disminuye en función de la separación de los canales y el uso de los canales no superpuestos) se ha extraído de [6] es la siguiente:

$ c_i - c_j $	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Solapamiento espectral	1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3: Interferencia cocanal en función de la separación de canales

Finalmente, definimos el área de cobertura (CA), que es la distancia a la cual la potencia transmisora y la sensibilidad de los receptores (σ) es la misma, este CA se calcula con la expresión:

$$CA = 10^{(P_t + G_t + G_r - L - \sigma - 7.6 + 20 \log_{10} (h_t h_r)) / 40}$$

- **Función de utilidad:** Para medir cuanto de buena es una asignación de canales, utilizamos la relación señal a interferencia (*SIR*: *Signal to Interference Ratio*) que es diferente según si su cálculo es desde el AP (o desde el cliente). Para el i -ésimo cliente, (vértice V_i) que se asocia con el j -ésimo AP (vértice V_j) y lo podemos calcular mediante la siguiente expresión:

$$SIR_i = \frac{S_{V_j \rightarrow V_i}}{\sum_k I_{V_k \rightarrow V_i}}$$

Para este cálculo se escoge la señal deseada que se recibe con menor potencia por lo que se obtiene el *SIR* mínimo para cada cliente.

Aunque estos valores obtenidos son correctos para calificar la asignación de canales, aun se puede mejorar, para ello, se utilizan los límites superiores e inferiores del *SIR*, es decir, si un dispositivo tiene el valor del *SIR* por debajo del límite inferior (SIR_{min}), la calidad de señal es mala y los dispositivos no pueden mantenerse conectados al AP, por tanto, el rendimiento y la utilidad es igual a cero. Si por el contrario, los valores del *SIR* están por encima del límite superior (SIR_{max}) el rendimiento queda limitado por la tecnología, y por tanto, la utilidad sería la máxima posible, es decir, su valor es uno. En conclusión, el valor de la utilidad para el dispositivo i (U_i) varía entre los valores cero y uno ($0 \leq U_i \leq 1$), entre dichos valores se ha utilizado una función lineal como podemos ver en el siguiente gráfico:

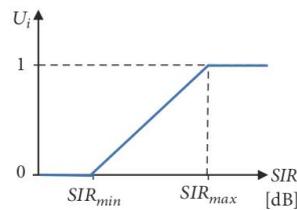


Figura 46: Representación de la Utilidad del dispositivo en función del *SIR* (dB)

Finalmente, definimos la utilidad para una determinada asignación de canales como la suma de la utilidad de todos los vértices del grafo siguiendo como podemos ver en la siguiente expresión:

$$U = \sum_{V_i} U_i$$

Esta expresión es de la utilidad es la que se ha utilizado para el cálculo de todas las asignaciones de canales excepto para la mejora del algoritmo AIIM, que se ha utilizado el cálculo de la utilidad del cluster (AP y clientes del propio AP) y, por tanto, se deben tener en cuenta tanto la utilidad del propio AP como la de todos sus clientes asociados. Para ello, utilizamos la siguiente expresión:

$$A = U_i + \sum_{V_k} U_j^k$$

donde U_i representa la utilidad de cada AP calculada con la fórmula anterior y U_j representa a cada cliente del propio AP, siendo k el total de clientes del AP.

Escenarios empleados

El escenario que se ha utilizado para el análisis y resultados obtenidos gracias a la implementación de los distintos algoritmos ha sido el de la primera planta de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá. Este edificio tiene una forma cuadrada de aproximada mente 130 metros cada lado, siendo un área total por planta de unos 16900 m² y podemos ver una representación de la facultad en la siguiente figura:

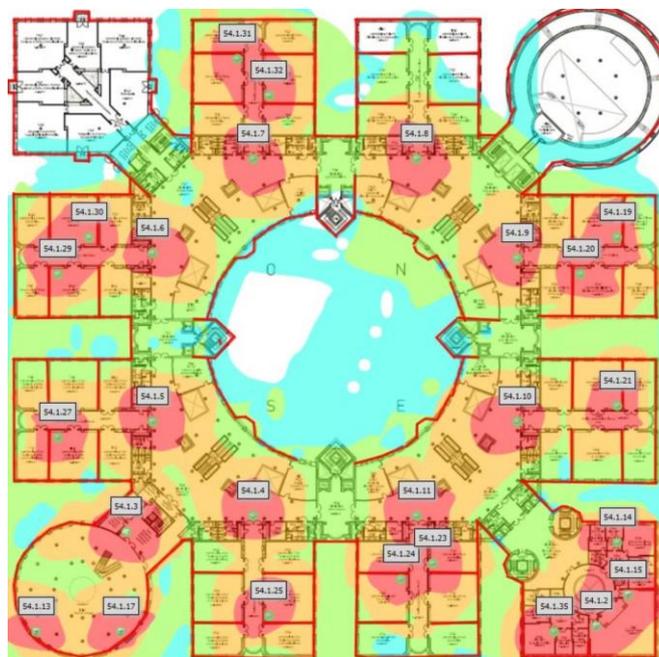


Figura 47: Esquema de la EPS con ubicación de APs y representación de la señal

En esta figura se puede observar el despliegue de los distintos APs y su posición real en el plano, estos APs vienen representados con un punto verde. Otra de las cosas que podemos ver es la representación del área de cobertura y su rango de señal ofrecida por todos ellos en el edificio. Este rango de señal de cobertura viene representado con una escala de colores de cálido a frío, donde el la mayor señal se ve representada en color rojo, seguido por el color naranja, posteriormente el color verde y por último el color azul, que representa el área donde se ofrece la menor señal de cobertura. Se puede comprobar como existen veintiséis puntos de acceso (26 APs) que ofrecen la mayor cobertura en el interior del edificio, la parte que ofrece la menor cobertura es el patio central. Este plano corresponde a la planta baja del edificio, donde se sitúan las distintas clases, un total de cuarenta y ocho, en las que imparten docencia a los alumnos de la facultad.

Para el análisis de esta situación vamos a considerar que puede haber estudiantes en clase, pero también pueden estar en la biblioteca, cafetería, mesas de estudio, patio central, ... Los estudiantes que no se encuentran en las aulas (consideramos que hay 100 alumnos en esta situación) estarán ubicados de forma aleatoria en el edificio siguiendo una distribución uniforme. Por otro lado, los alumnos ubicados de forma aleatoria en las aulas (considerando que hay 25 alumnos en cada aula) seguirán una distribución normal alrededor del centro de cada aula con una desviación típica normalizada al tamaño del escenario de 0,05. Finalmente, consideraremos también distintas utilizaciones aleatorias de las distintas aulas con tres escenarios distintos de ubicación de estudiantes para cada caso, estos casos son el uso de 12, 24, 36 o 48 aulas ($\Psi \in \{0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$).

Los distintos escenarios que se van a utilizar para la comparación de las diferentes técnicas de asociación de canales son los siguientes:

Para estos tres primeros escenarios, la ocupación de las aulas será del 25% ($\Psi=0.25$), esto es, 12 aulas ocupadas, por tanto, los estudiantes conectados a los distintos APs serán un total de 400 estudiantes.

- **Escenario 1:** Correspondiente a la primera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

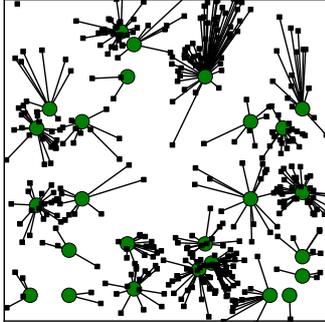


Figura 48: Grafo G escenario 1

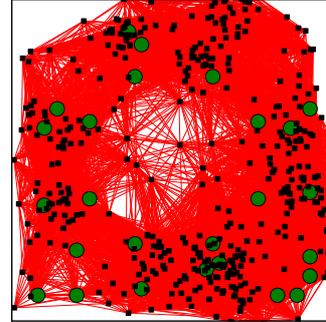


Figura 49: Grafo I escenario 1

- **Escenario 2:** Correspondiente a la segunda distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

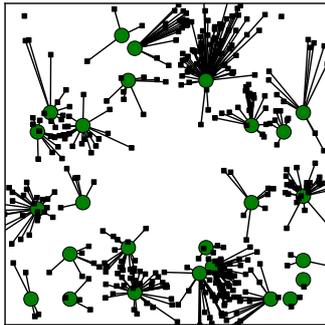


Figura 50: Grafo G escenario 2

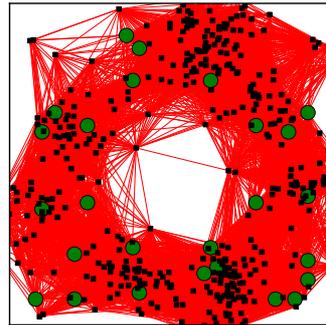


Figura 51: Grafo I escenario 2

- **Escenario 3:** Correspondiente a la tercera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

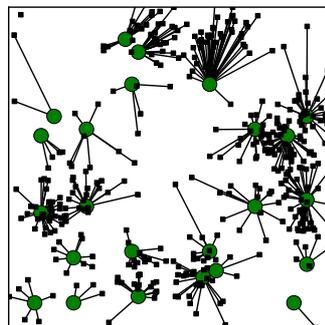


Figura 52: Grafo G escenario 3

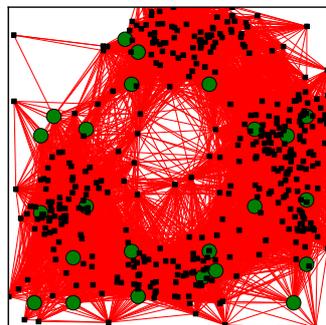


Figura 53: Grafo I escenario 3

Para estos tres siguientes escenarios, la ocupación de las aulas será del 50% ($\Psi=0.5$), esto es, 24 aulas ocupadas, por tanto, los estudiantes conectados a los distintos APs serán un total de 700 estudiantes.

- **Escenario 4:** Correspondiente a la primera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

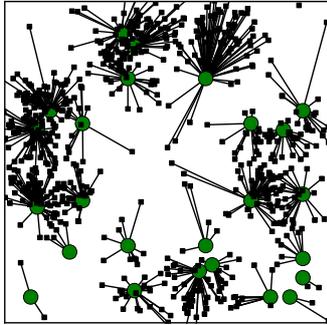


Figura 54: Grafo G escenario 4

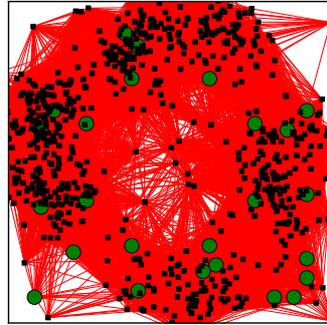


Figura 55: Grafo I escenario 4

- **Escenario 5:** Correspondiente a la segunda distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

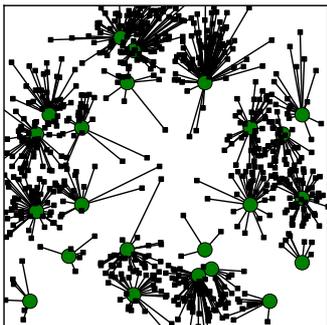


Figura 56: Grafo G escenario 5

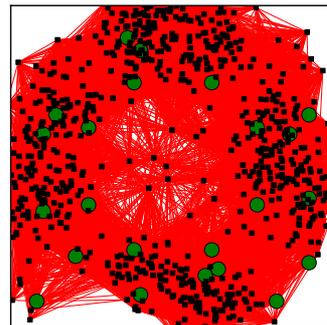


Figura 57: Grafo I escenario 5

- **Escenario 6:** Correspondiente a la tercera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

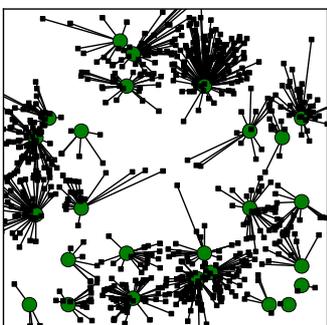


Figura 58: Grafo G escenario 6

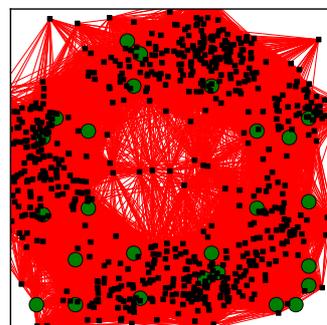


Figura 59: Grafo I escenario 6

Para estos tres siguientes escenarios, la ocupación de las aulas será del 75% ($\Psi=0.75$), esto es, 36 aulas ocupadas, por tanto, los estudiantes conectados a los distintos APs serán un total de 1000 estudiantes.

- **Escenario 7:** Correspondiente a la primera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

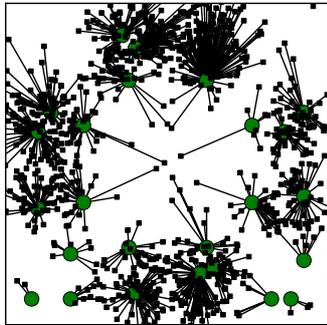


Figura 60: Grafo G escenario 7

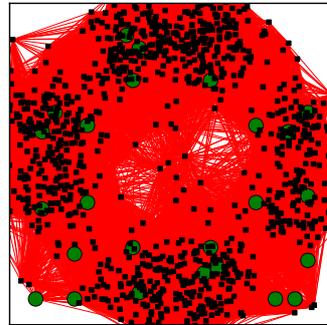


Figura 61: Grafo I escenario 7

- **Escenario 8:** Correspondiente a la segunda distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

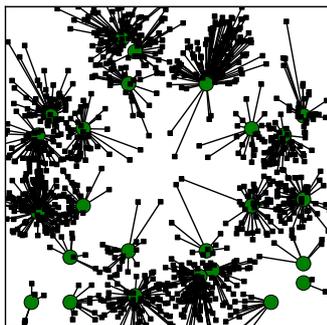


Figura 62: Grafo G escenario 8

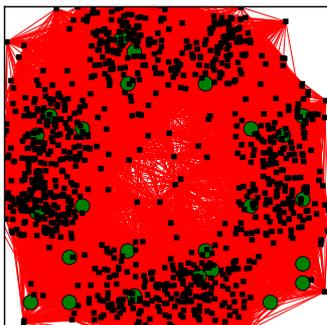


Figura 63: Grafo I escenario 8

- **Escenario 9:** Correspondiente a la tercera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

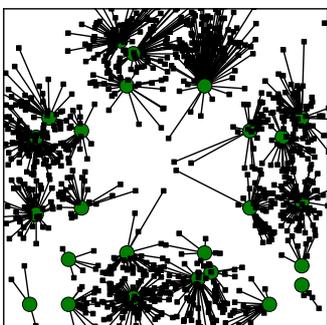


Figura 64: Grafo G escenario 9

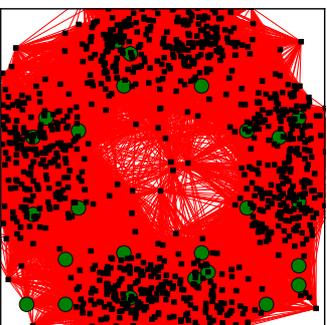


Figura 65: Grafo I escenario 9

Para estos tres últimos escenarios, la ocupación de las aulas será del 100% ($\Psi=1.0$), esto es, 48 aulas ocupadas, por tanto, los estudiantes conectados a los distintos APs serán un total de 1300 estudiantes.

- **Escenario 10:** Correspondiente a la primera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

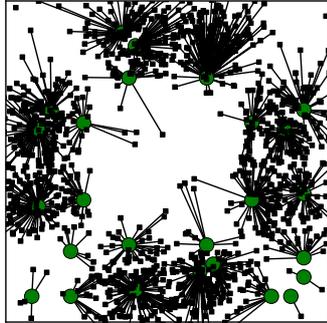


Figura 66: Grafo G escenario 10

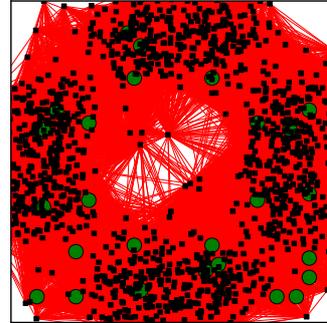


Figura 67: Grafo I escenario 10

- **Escenario 11:** Correspondiente a la segunda distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

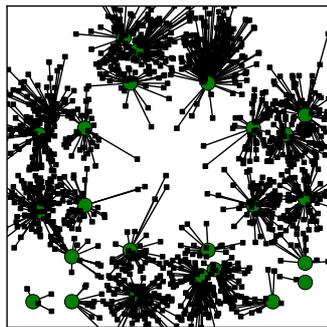


Figura 68: Grafo G escenario 11

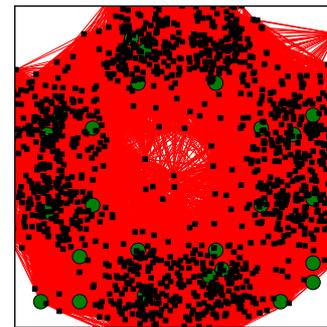


Figura 69: Grafo I escenario 11

- **Escenario 12:** Correspondiente a la tercera distribución aleatoria de estudiantes en la EPS.

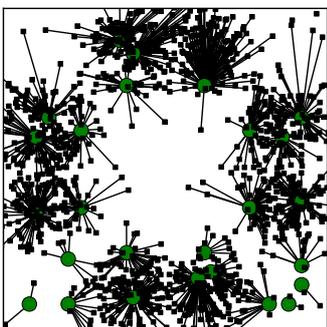


Figura 70: Grafo G escenario 12

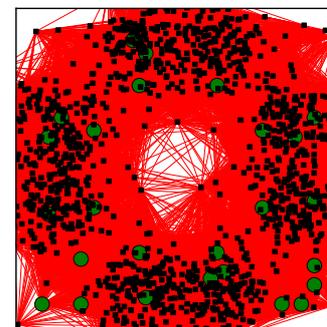


Figura 71: Grafo I escenario 12

Los valores de los parámetros que hemos utilizado para la descripción del modelo de propagación son los siguientes:

- Potencia de transmisión: $P_t = 30 \text{ mW} = 14.77 \text{ dBm}$
- Ganancia de la antena transmisora: $G_t = 0 \text{ dB}$
- Ganancia de la antena receptora: $G_r = 0 \text{ dB}$
- Pérdidas por obstáculos: $L = 40 \text{ dB}$
- Sensibilidad de los receptores: $\sigma = -90 \text{ dBm}$
- Altura de la antena transmisora: $h_t = 1.5 \text{ m}$
- Altura de la antena receptora: $h_r = 1.5 \text{ m}$
- Distancia entre antenas: $d \text{ (metros) }^*$
- Índice de actividad de APs: $\Psi \text{ (APs)} = 0.5$
- Índice de actividad de clientes: $\Psi \text{ (Clientes)} = 0.2$

Los valores de la relación señal a interferencia (SIR) máximo y mínimo son:

- $SIR_{min} = 10 \text{ dB}$
- $SIR_{max} = 40 \text{ dB}$

Por lo que el gráfico de la utilidad en función del SIR quedaría de la siguiente manera:

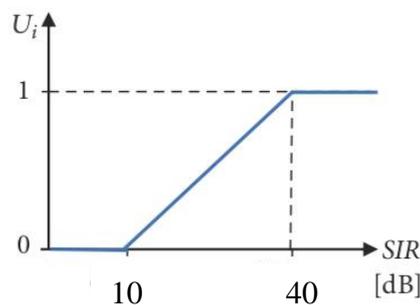


Figura 72: Representación de la utilidad del dispositivo en función del SIR (dB)

* La distancia en metros entre las antenas transmisora y receptora es variable en función de los APs entre los que queremos calcular las pérdidas, por tanto no la definimos con un valor exacto.

Resultados

Lo primero que vamos a definir en este apartado son los diferentes tipos de resultados que obtenemos, para posteriormente mostrar los resultados obtenidos tanto por una técnica para todos los grafos como para un grafo con todas las técnicas y extraer algunas valoraciones y conclusiones.

Definición de los tipos de resultados obtenidos

Hemos obtenido tres tipos diferentes de resultados para la valoración de las diferentes técnicas implementadas, gracias a estos resultados obtenidos podemos realizar una justa comparación entre las asignaciones. Estos tres tipos de resultados son:

- **Utilidad media:** La obtenemos con la función de utilidad descrita en el apartado anterior. Lo que hacemos es ejecutar 10 veces cada algoritmo almacenando los valores obtenidos de la función de utilidad en cada ejecución para posteriormente realizar la media de las utilidades.
- **Utilidad máxima:** La obtenemos con la función de utilidad descrita en el apartado anterior. Lo que hacemos es ejecutar 10 veces cada algoritmo almacenando los valores obtenidos de la función de utilidad en cada ejecución para posteriormente buscar el valor máximo de las utilidades.
- **Utilidad mínima:** La obtenemos con la función de utilidad descrita en el apartado anterior. Lo que hacemos es ejecutar 10 veces cada algoritmo almacenando los valores obtenidos de la función de utilidad en cada ejecución para posteriormente buscar el valor mínimo de las utilidades.
- **Intervalo de confianza:** Este intervalo de confianza se ha calculado siempre al 95%, haciéndose de la siguiente manera. Primero, con la función *interval* () del paquete *stat* de la librería *SciPy* (Librería de funciones estadísticas). Empleando la versión 1.1.0 de este paquete, la función es de la forma:

scipy.stat.interval (*alpha*, **args*)

donde *alpha* es la probabilidad de que el valor esté dentro del rango devuelto, por tanto este valor de *alpha* debe estar entre [0,1] y el argumento que le pasamos es el tamaño de la lista de utilidades menos uno. El valor que devuelve esta función es el porcentaje de valores posibles (ssi_{max}).

Segundo, calculamos la desviación estándar con la función *std* () de la librería *NumPy* (Librería de cálculo científico). Empleando la versión 1.15.4 de este paquete, la función es de la siguiente forma:

numpy.std (*a*, *ddof*)

donde *a* es el array de valores del cual queremos calcular la desviación estándar, en nuestro caso, las utilidades calculadas y el parámetro *ddof* (*Delta Degrees Of Freedom*), en nuestro caso tomará el valor 1, por tanto, el divisor utilizado en los cálculos es el número de elementos *a* menos 1. El valor que devuelve es la desviación estándar de las utilidades calculadas (*deu*).

Finalmente, calculamos la amplitud del intervalo de confianza (*CI*), para ello, empleamos la siguiente fórmula:

$$CI = ssi_{max} \cdot deu / \sqrt{numElem}$$

donde *numElem* es el número de utilidades que hemos calculado.

Resultados numéricos obtenidos por técnica para todos los grafos

Ahora, podemos ver los resultados obtenidos con las diversas técnicas implementadas para su posterior comparación entre ellos, diferenciando también el número de canales que utilizamos, 3 canales u 11 canales.

Vamos a mostrar los resultados obtenidos con una técnica para todos los gráficos:

- Los resultados obtenidos con la asignación de canales Random con 20 ejecuciones del algoritmo son los siguientes:

Random (11 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	44,90	7,50	23,27	86,95
EPS-0.25-2	40,33	3,65	27,39	60,68
EPS-0.25-3	49,75	6,00	27,87	69,81
EPS-0.5-1	58,79	6,98	34,57	95,69
EPS-0.5-2	59,01	7,76	31,05	90,49
EPS-0.5-3	75,29	10,52	45,66	143,25
EPS-0.75-1	86,95	12,82	54,83	152,65
EPS-0.75-2	85,29	11,40	46,67	136,97
EPS-0.75-3	99,15	16,88	48,33	166,60
EPS-1-1	104,77	18,22	62,72	216,13
EPS-1-2	99,46	10,91	72,15	158,33
EPS-1-3	95,27	14,82	49,07	175,01

Tabla 4: Resultados Random 11 canales

Random (3 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	77,43	9,91	40,09	118,79
EPS-0.25-2	66,95	10,61	38,72	129,02
EPS-0.25-3	74,75	6,15	52,06	99,05
EPS-0.5-1	98,96	12,32	53,07	140,34
EPS-0.5-2	90,65	11,28	49,84	150,45
EPS-0.5-3	123,49	16,01	68,44	209,26
EPS-0.75-1	133,79	19,58	80,73	224,97
EPS-0.75-2	154,41	24,31	69,86	245,55
EPS-0.75-3	135,84	17,13	61,71	197,31
EPS-1-1	148,70	20,55	83,01	238,03
EPS-1-2	196,50	26,68	95,06	314,07
EPS-1-3	152,96	19,62	61,59	229,46

Tabla 5: Resultados Random 3 canales

- Los resultados obtenidos con la asignación de canales SA con 20 ejecuciones del algoritmo son los siguientes:

SA (11 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	183,28	5,62	166,22	205,20
EPS-0.25-2	180,96	8,93	141,95	203,93
EPS-0.25-3	168,98	3,89	152,96	186,53
EPS-0.5-1	245,41	9,81	186,04	272,74
EPS-0.5-2	251,08	5,98	225,47	272,69
EPS-0.5-3	281,72	13,07	214,41	317,49
EPS-0.75-1	353,70	15,29	295,79	420,24
EPS-0.75-2	377,90	11,04	330,29	427,25
EPS-0.75-3	359,97	9,38	298,18	388,85
EPS-1-1	422,44	13,52	369,78	476,64
EPS-1-2	425,78	16,12	363,79	481,75
EPS-1-3	397,04	13,18	320,37	465,31

Tabla 6: Resultados SA 11 canales

SA (3 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	173,95	5,94	159,85	185,01
EPS-0.25-2	149,83	9,21	138,10	179,57
EPS-0.25-3	156,40	6,73	144,58	170,60
EPS-0.5-1	216,69	7,94	198,01	230,66
EPS-0.5-2	242,97	14,87	215,85	271,45
EPS-0.5-3	276,62	14,81	244,89	302,18
EPS-0.75-1	322,17	14,94	297,77	373,62
EPS-0.75-2	343,87	20,43	293,12	388,15
EPS-0.75-3	328,68	16,91	290,56	376,97
EPS-1-1	386,52	17,94	349,75	424,14
EPS-1-2	402,60	13,49	370,66	441,68
EPS-1-3	371,72	18,33	324,48	407,85

Tabla 7: Resultados SA 3 canales

- Los resultados obtenidos con la asignación de canales KCKC con 20 ejecuciones del algoritmo son los siguientes:

KCKC (11 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	56,36	5,32	40,43	82,73
EPS-0.25-2	50,05	4,71	38,15	71,75
EPS-0.25-3	52,49	4,23	37,09	74,00
EPS-0.5-1	63,20	8,02	37,24	95,09
EPS-0.5-2	65,91	7,87	41,87	102,38
EPS-0.5-3	87,62	15,57	53,06	185,03
EPS-0.75-1	106,11	19,02	69,95	249,89
EPS-0.75-2	95,87	6,48	73,61	127,05
EPS-0.75-3	108,10	9,73	65,02	145,41
EPS-1-1	114,97	20,93	78,08	270,45
EPS-1-2	134,39	10,73	103,51	188,42
EPS-1-3	106,37	13,77	69,56	167,60

Tabla 8: Resultados KCKC 11 canales

KCKC (3 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	94,93	9,31	46,18	129,46
EPS-0.25-2	81,89	10,28	7,04	129,46
EPS-0.25-3	83,96	11,88	45,28	142,27
EPS-0.5-1	117,47	15,86	67,55	189,44
EPS-0.5-2	118,33	13,92	49,31	171,76
EPS-0.5-3	138,43	19,23	80,49	241,89
EPS-0.75-1	179,63	24,51	75,39	293,49
EPS-0.75-2	181,69	28,33	72,16	317,33
EPS-0.75-3	157,16	15,99	85,28	211,47
EPS-1-1	204,60	22,71	122,63	317,76
EPS-1-2	197,95	34,93	86,32	373,31
EPS-1-3	203,09	22,47	133,99	315,83

Tabla 9: Resultados KCKC 3 canales

- Los resultados obtenidos con la asignación de canales HZNA con 20 ejecuciones del algoritmo son los siguientes:

HZNA (11 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	114,88	10,95	70,15	143,35
EPS-0.25-2	132,66	13,89	78,97	159,01
EPS-0.25-3	74,18	5,82	62,74	111,97
EPS-0.5-1	125,09	10,70	90,82	149,17
EPS-0.5-2	102,97	13,53	70,99	159,97
EPS-0.5-3	156,76	19,54	91,11	193,46
EPS-0.75-1	193,86	27,38	122,55	272,95
EPS-0.75-2	181,63	20,77	113,91	256,73
EPS-0.75-3	185,67	25,30	113,66	257,97
EPS-1-1	226,22	18,54	143,18	297,75
EPS-1-2	220,60	30,91	129,52	327,38
EPS-1-3	256,76	16,86	160,91	305,55

Tabla 10: Resultados HZNA 11 canales

HZNA (3 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	96,43	4,11	81,03	111,37
EPS-0.25-2	91,21	4,18	67,17	103,17
EPS-0.25-3	118,71	5,98	99,61	138,03
EPS-0.5-1	154,97	6,54	128,30	176,49
EPS-0.5-2	144,98	9,53	115,86	203,09
EPS-0.5-3	165,49	7,52	126,98	183,09
EPS-0.75-1	210,42	13,97	153,40	265,64
EPS-0.75-2	193,38	15,81	151,98	273,57
EPS-0.75-3	208,13	14,36	171,00	289,97
EPS-1-1	232,28	11,44	198,85	280,96
EPS-1-2	245,92	17,17	198,54	317,37
EPS-1-3	230,31	13,37	154,84	272,76

Tabla 11: Resultados HZNA 3 canales

- Los resultados obtenidos con la asignación de canales Abeysekera con 20 ejecuciones del algoritmo son los siguientes:

AIIM (11 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	78,92	7,03	42,67	110,29
EPS-0.25-2	59,62	8,10	36,95	120,54
EPS-0.25-3	77,24	8,32	40,66	111,78
EPS-0.5-1	84,54	12,75	48,84	148,23
EPS-0.5-2	100,47	13,72	43,37	153,71
EPS-0.5-3	97,89	14,28	62,88	188,12
EPS-0.75-1	112,49	20,10	47,89	202,59
EPS-0.75-2	127,74	14,90	80,58	190,64
EPS-0.75-3	129,42	19,93	78,60	201,67
EPS-1-1	141,47	27,83	64,34	273,68
EPS-1-2	147,13	21,69	80,50	247,54
EPS-1-3	140,08	25,70	59,45	275,97

Tabla 12: Resultados AIIM 11 canales

AIIM (3 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	99,80	7,83	65,73	139,30
EPS-0.25-2	83,60	7,86	61,45	119,70
EPS-0.25-3	95,53	6,48	73,59	130,27
EPS-0.5-1	134,80	10,42	97,22	189,40
EPS-0.5-2	148,09	12,94	97,19	209,60
EPS-0.5-3	130,84	17,43	70,28	222,31
EPS-0.75-1	176,98	22,08	109,96	275,50
EPS-0.75-2	193,21	19,66	122,30	288,42
EPS-0.75-3	149,17	19,93	80,83	248,25
EPS-1-1	204,19	22,06	123,15	301,60
EPS-1-2	199,16	17,91	139,85	273,07
EPS-1-3	177,02	18,16	123,58	261,21

Tabla 13: Resultados AIIM 3 canales

- Los resultados obtenidos con la mejora de la asignación de canales AIIM utilizando el cluster con 20 ejecuciones del algoritmo son los siguientes:

Mejora AIIM (11 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	108,03	4,84	85,47	127,10
EPS-0.25-2	96,94	6,62	76,13	139,31
EPS-0.25-3	104,95	3,97	90,62	121,39
EPS-0.5-1	155,56	6,86	118,99	176,68
EPS-0.5-2	152,09	7,34	110,49	180,85
EPS-0.5-3	163,30	10,69	128,20	212,53
EPS-0.75-1	207,58	12,12	155,05	243,16
EPS-0.75-2	208,65	9,54	172,59	243,52
EPS-0.75-3	218,77	12,73	169,74	267,36
EPS-1-1	264,49	16,49	187,40	318,44
EPS-1-2	254,53	13,34	200,42	314,38
EPS-1-3	230,98	14,05	171,08	297,12

Tabla 14: Resultados mejora AIIM 11 canales

Mejora AIIM (3 canales)				
Grafo	U _{sum}		U _{min}	U _{max}
	Media	CI		
EPS-0.25-1	125,16	5,27	101,42	143,71
EPS-0.25-2	115,85	6,94	97,45	152,67
EPS-0.25-3	127,51	5,70	112,43	156,41
EPS-0.5-1	167,24	6,29	145,02	195,68
EPS-0.5-2	184,46	9,11	150,55	232,02
EPS-0.5-3	184,92	8,88	150,23	213,67
EPS-0.75-1	231,10	11,06	194,49	288,40
EPS-0.75-2	238,79	7,65	211,72	287,35
EPS-0.75-3	241,22	11,77	168,14	294,93
EPS-1-1	275,01	10,50	232,16	331,89
EPS-1-2	283,13	11,37	233,56	309,13
EPS-1-3	258,17	10,36	218,29	298,99

Tabla 15: Resultados mejora AIIM 3 canales

Conclusiones obtenidas

Viendo los distintos resultados obtenidos, podemos extraer de ellos las siguientes conclusiones:

- Como podemos observar, para todos los algoritmos implementados se obtienen mejores resultados cuando utilizamos 3 canales, esto es debido a que al utilizar los canales no superpuestos evitamos la interferencia cocanal y, por tanto, conseguimos mejorar los resultados de utilidad del grafo.
- Las excepciones se producen en la asignación de canales HZNA y la técnica SA:
 - En HZNA se obtienen unos resultados similares para el uso tanto de 3 canales como de 11 canales, esto es debido a que HZNA, cuando se utilizan 11 canales no significa que los 11 canales tengan que tener APs asignados, sino que, de lo que trata es de asignar el menor número posible de canales para conseguir una asignación óptima y por ello en algunos grafos se obtienen mejores resultados con el uso de 3 canales que con 11 canales y en otros grafos es lo contrario, pero con todos los grafos utilizados conseguimos unos rendimientos de red similares independientemente de los canales que se utilicen.
 - En SA se consiguen unos mejores resultados para el uso de 11 canales, esto es debido a que el algoritmo metaheurístico trata de asignar los mejores canales a cada AP, y por tanto, cuando trabajamos con 11 canales estamos dando un mayor abanico de posibilidades de asignación y, por tanto, será más fácil asignar al AP el canal que mayor rendimiento proporcione a la red, mientras que con 3 canales estaríamos proporcionando una utilización más restrictiva de los canales.
- Por último, otra de las cosas que debemos aclarar es la obtención de mejores resultados con la técnica alternativa a AIIM, esta técnica consiste en calcular las utilidades de los cluster (APs y clientes) y, gracias a esto, conseguimos maximizar la utilidad ya que tenemos en cuenta todo tipo de interferencias, tanto las interferencias entre APs, como las interferencias entre clientes como las interferencias entre APs y clientes. Al tener en cuenta todas estas interferencias lo que conseguimos es un mejor rendimiento de la red.

Resultados numéricos obtenidos en un grafo por todas las técnicas

Ahora, podemos ver los resultados obtenidos en un grafo utilizando las diversas técnicas implementadas para su posterior comparación entre ellos, diferenciando también el número de canales que utilizamos, 3 canales u 11 canales.

Vamos a mostrar los resultados obtenidos en un grafo con las diferentes técnicas, pero dado que con esta forma podemos realizar una comparación más fácil de forma justa (trabajan todas las técnicas sobre el mismo grafo) vamos a mostrar los resultados también de forma más visual para extraer mejor algunas de las conclusiones:

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.25-1* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.25-1 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	50,65	5,88	28,36	74,03
SA	183,28	5,62	166,22	205,20
KCKC	56,36	5,32	40,43	82,73
HZNA	114,88	10,95	70,15	143,35
AIIM	78,92	7,03	42,67	110,29
Mejora AIIM	108,03	4,84	85,47	127,10

Tabla 16: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.25-1

Grafo EPS-0.25-1 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	77,43	9,91	40,09	118,79
SA	173,95	5,94	159,85	185,01
KCKC	94,93	9,31	46,18	129,46
HZNA	96,43	4,11	81,03	111,37
AIIM	99,80	7,83	65,73	139,30
Mejora AIIM	125,16	5,27	101,42	143,71

Tabla 17: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.25-1

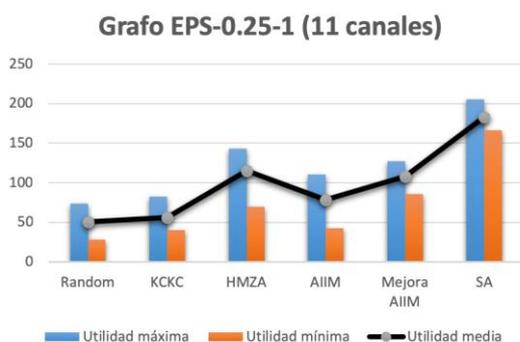


Figura 73: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.25-1

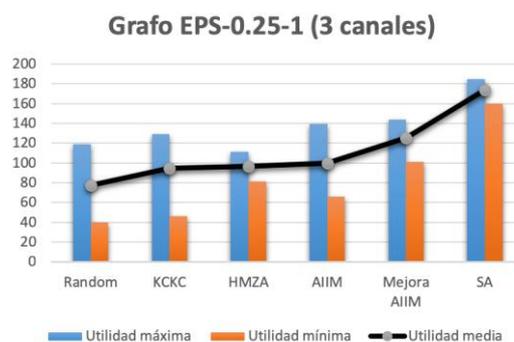


Figura 74: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.25-1

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.25-2* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.25-2 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	40,33	3,65	27,39	60,68
SA	180,96	8,93	141,95	203,93
KCKC	50,05	4,71	38,15	71,75
HZNA	132,66	13,89	78,97	159,01
AIIM	59,62	8,10	36,95	120,54
Mejora AIIM	96,94	6,62	76,13	139,31

Tabla 18: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-2

Grafo EPS-0.25-2 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	66,95	10,61	38,72	129,02
SA	149,83	9,21	138,10	179,57
KCKC	81,89	10,28	7,04	129,46
HZNA	91,21	4,18	67,17	103,17
AIIM	83,60	7,86	61,45	119,70
Mejora AIIM	115,85	6,94	97,45	152,67

Tabla 19: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.25-2

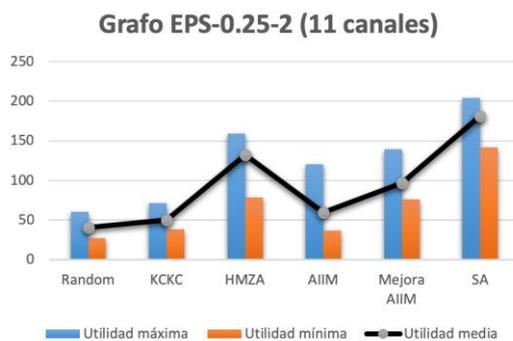


Figura 75: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.25-2

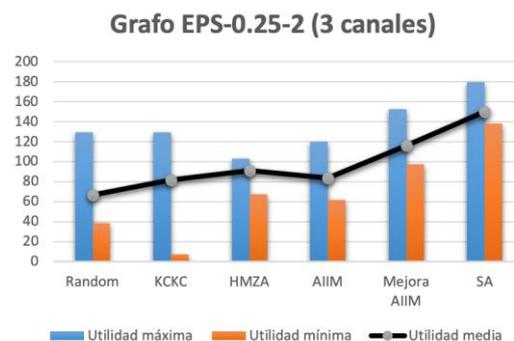


Figura 76: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.25-2

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.25-3* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.25-3 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	49,75	6,00	27,87	69,81
SA	168,98	3,89	152,96	186,53
KCKC	52,49	4,23	37,09	74,00
HZNA	74,18	5,82	62,74	111,97
AIIM	77,24	8,32	40,66	111,78
Mejora AIIM	104,95	3,97	90,62	121,39

Tabla 20: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.25-3

Grafo EPS-0.25-3 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	74,75	6,15	52,06	99,05
SA	156,40	6,73	144,58	170,60
KCKC	83,96	11,88	45,28	142,27
HZNA	118,71	5,98	99,61	138,03
AIIM	95,53	6,48	73,59	130,27
Mejora AIIM	127,51	5,70	112,43	156,41

Tabla 21: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.25-3

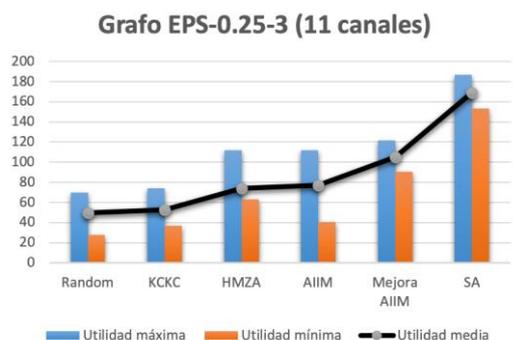


Figura 77: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.25-3

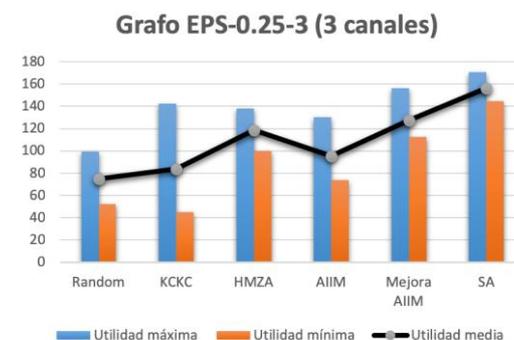


Figura 78: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.25-3

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.5-1* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.5-1 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	58,79	6,98	34,57	95,69
SA	245,41	9,81	186,04	272,74
KCKC	63,20	8,02	37,24	95,09
HZNA	125,09	10,70	90,82	149,17
AIIM	84,54	12,75	48,84	148,23
Mejora AIIM	155,56	6,86	118,99	176,68

Tabla 22: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-1

Grafo EPS-0.5-1 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	98,96	12,32	53,07	140,34
SA	216,69	7,94	198,01	230,66
KCKC	117,47	15,86	67,55	189,44
HZNA	154,97	6,54	128,30	176,49
AIIM	134,80	10,42	97,22	189,40
Mejora AIIM	167,24	6,29	145,02	195,68

Tabla 23: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.5-1

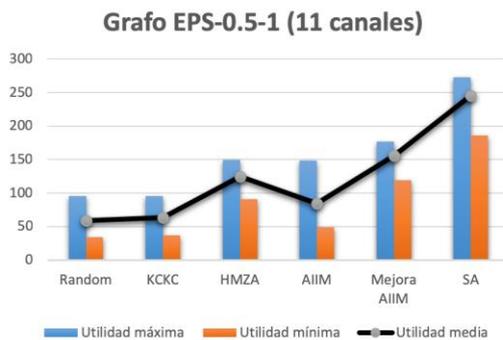


Figura 79: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-1

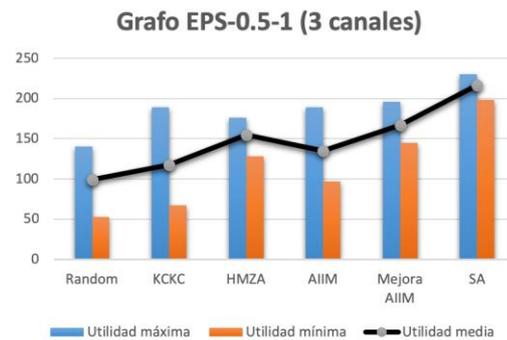


Figura 80: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.5-1

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.5-2* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.5-2 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	59,01	7,76	31,05	90,49
SA	251,08	5,98	225,47	272,69
KCKC	65,91	7,87	41,87	102,38
HZNA	102,97	13,53	70,99	159,97
AIIM	100,47	13,72	43,37	153,71
Mejora AIIM	152,09	7,34	110,49	180,85

Tabla 24: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-2

Grafo EPS-0.5-2 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	90,65	11,28	49,84	150,45
SA	242,97	14,87	215,85	271,45
KCKC	118,33	13,92	49,31	171,76
HZNA	144,98	9,53	115,86	203,09
AIIM	148,09	12,94	97,19	209,60
Mejora AIIM	184,46	9,11	150,55	232,02

Tabla 25: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.5-2

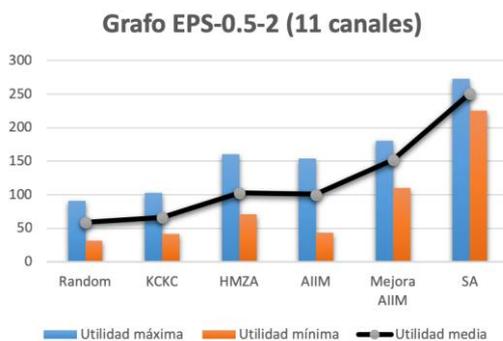


Figura 81: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-2

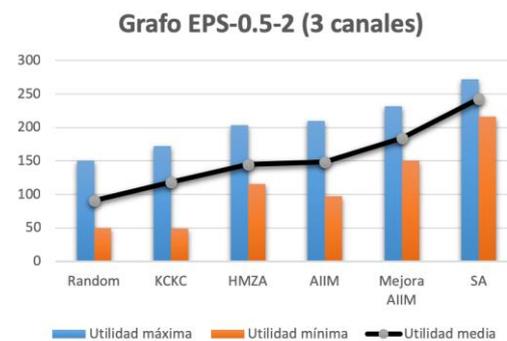


Figura 82: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.5-2

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.5-3* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.5-3 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	75,29	10,52	45,66	143,25
SA	281,72	13,07	214,41	317,49
KCKC	87,62	15,57	53,06	185,03
HZNA	156,76	19,54	91,11	193,46
AIIM	97,89	14,28	62,88	188,12
Mejora AIIM	163,30	10,69	128,20	212,53

Tabla 26: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-3

Grafo EPS-0.5-3 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	123,49	16,01	68,44	209,26
SA	276,62	14,81	244,89	302,18
KCKC	138,43	19,23	80,49	241,89
HZNA	165,49	7,52	126,98	183,09
AIIM	130,84	17,43	70,28	222,31
Mejora AIIM	184,92	8,88	150,23	213,67

Tabla 27: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.5-3

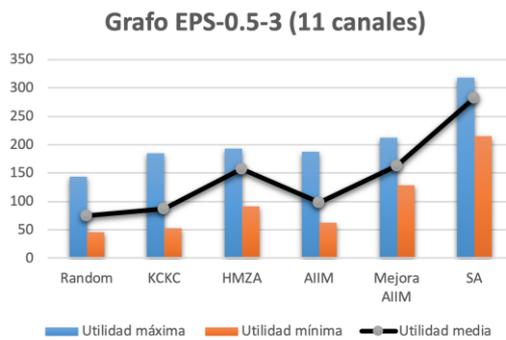


Figura 83: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.5-3

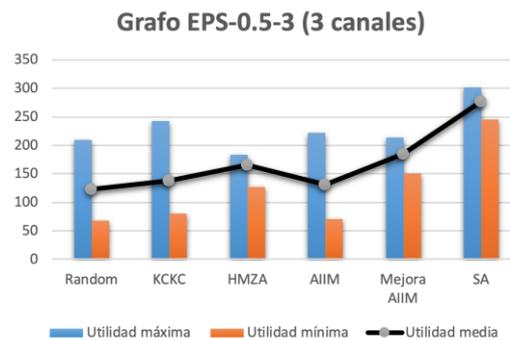


Figura 84: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.5-3

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.75-1* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.75-1 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	86,95	12,82	54,83	152,65
SA	353,70	15,29	295,79	420,24
KCKC	106,11	19,02	69,95	249,89
HZNA	193,86	27,38	122,55	272,95
AIIM	112,49	20,10	47,89	202,59
Mejora AIIM	207,58	12,12	155,05	243,16

Tabla 28: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.75-1

Grafo EPS-0.75-1 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	133,79	19,58	80,73	224,97
SA	322,17	14,94	297,77	373,62
KCKC	179,63	24,51	75,39	293,49
HZNA	210,42	13,97	153,40	265,64
AIIM	176,98	22,08	109,96	275,50
Mejora AIIM	231,10	11,06	194,49	288,40

Tabla 29: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.75-1

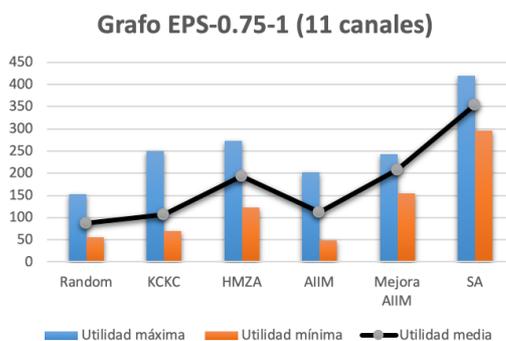


Figura 85: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.75-1

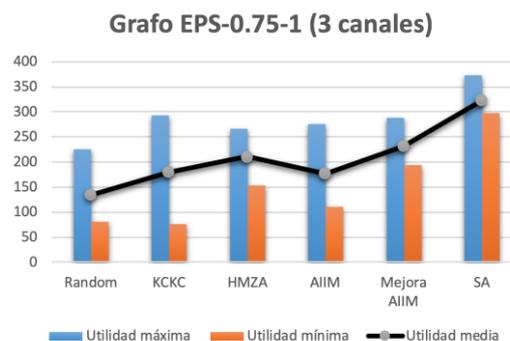


Figura 86: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.75-1

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.75-2* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.75-2 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	85,29	11,40	46,67	136,97
SA	377,90	11,04	330,29	427,25
KCKC	95,87	6,48	73,61	127,05
HZNA	181,63	20,77	113,91	256,73
AIIM	127,74	14,90	80,58	190,64
Mejora AIIM	208,65	9,54	172,59	243,52

Tabla 30: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.75-2

Grafo EPS-0.75-2 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	154,41	24,31	69,86	245,55
SA	343,87	20,43	293,12	388,15
KCKC	181,69	28,33	72,16	317,33
HZNA	193,38	15,81	151,98	273,57
AIIM	193,21	19,66	122,30	288,42
Mejora AIIM	238,79	7,65	211,72	287,35

Tabla 31: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.75-2

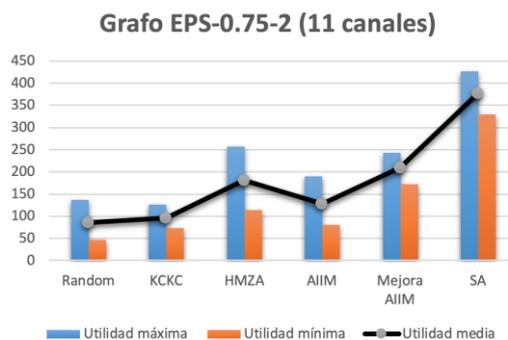


Figura 87: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.75-2

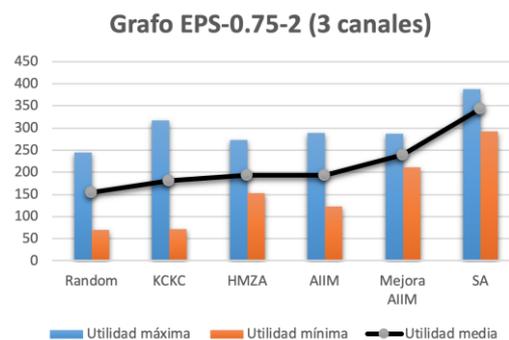


Figura 88: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.75-2

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-0.75-3* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-0.75-3 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	99,15	16,88	48,33	166,60
SA	359,97	9,38	298,18	388,85
KCKC	108,10	9,73	65,02	145,41
HZNA	185,67	25,30	113,66	257,97
AIIM	129,42	19,93	78,60	201,67
Mejora AIIM	218,77	12,73	169,74	267,36

Tabla 32: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.75-3

Grafo EPS-0.75-3 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	135,84	17,13	61,71	197,31
SA	328,68	16,91	290,56	376,97
KCKC	157,16	15,99	85,28	211,47
HZNA	208,13	14,36	171,00	289,97
AIIM	149,17	19,93	80,83	248,25
Mejora AIIM	241,22	11,77	168,14	294,93

Tabla 33: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.75-3

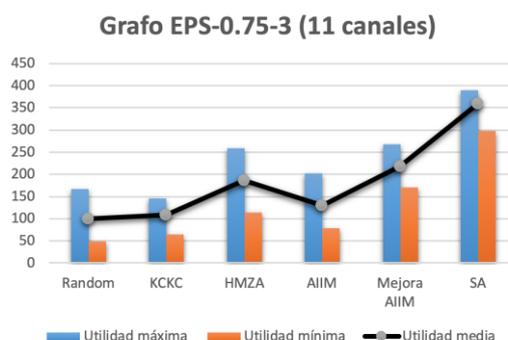


Figura 89: Resultados 11 canales Grafo EPS-0.75-3

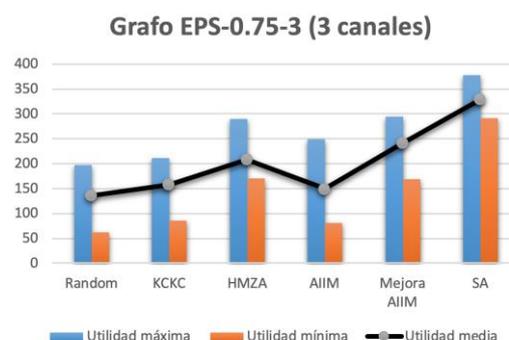


Figura 90: Resultados 3 canales Grafo EPS-0.75-3

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-1-1* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-1-1 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	104,77	18,22	62,72	216,13
SA	422,44	13,52	369,78	476,64
KCKC	114,97	20,93	78,08	270,45
HZNA	226,22	18,54	143,18	297,75
AIIM	141,47	27,83	64,34	273,68
Mejora AIIM	264,49	16,49	187,40	318,44

Tabla 34: Resultados 11 canales Grafo EPS-1-1

Grafo EPS-1-1 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	148,70	20,55	83,01	238,03
SA	386,52	17,94	349,75	424,14
KCKC	204,60	22,71	122,63	317,76
HZNA	232,28	11,44	198,85	280,96
AIIM	204,19	22,06	123,15	301,60
Mejora AIIM	275,01	10,50	232,16	331,89

Tabla 35: Resultados 3 canales Grafo EPS-1-1

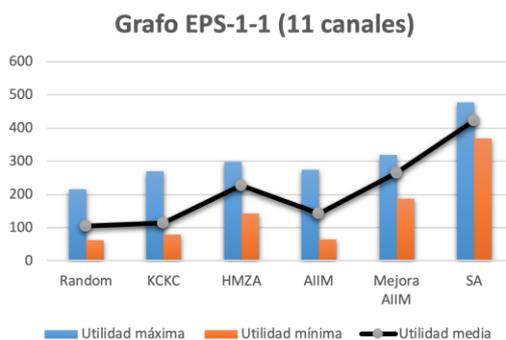


Figura 91: Resultados 11 canales Grafo EPS-1-1

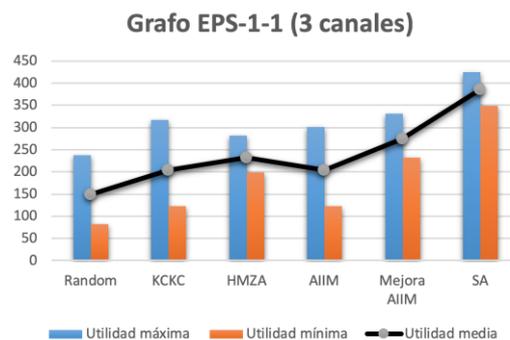


Figura 92: Resultados 3 canales Grafo EPS-1-1

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-1-2* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-1-2 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	99,46	10,91	72,15	158,33
SA	425,78	16,12	363,79	481,75
KCKC	134,39	10,73	103,51	188,42
HZNA	220,60	30,91	129,52	327,38
AIIM	147,13	21,69	80,50	247,54
Mejora AIIM	254,53	13,34	200,42	314,38

Tabla 36: Resultados 11 canales Grafo EPS-1-2

Grafo EPS-1-2 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	196,50	26,68	95,06	314,07
SA	402,60	13,49	370,66	441,68
KCKC	197,95	34,93	86,32	373,31
HZNA	245,92	17,17	198,54	317,37
AIIM	199,16	17,91	139,85	273,07
Mejora AIIM	283,13	11,37	233,56	309,13

Tabla 37: Resultados 3 canales Grafo EPS-1-2

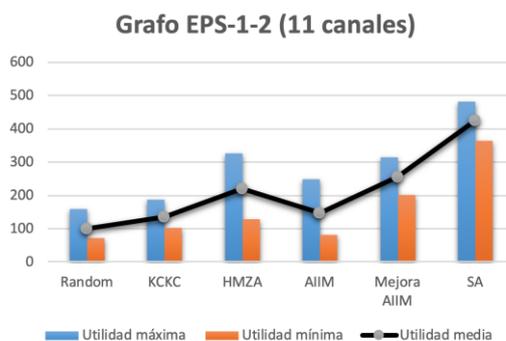


Figura 93: Resultados 11 canales Grafo EPS-1-2

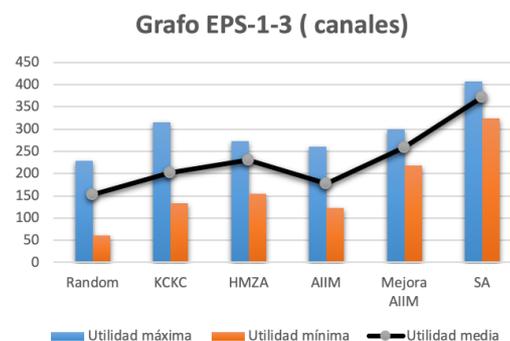


Figura 94: Resultados 3 canales Grafo EPS-1-2

- Los resultados obtenidos en el grafo *EPS-1-3* con 20 ejecuciones de los diversos algoritmos implementados son los siguientes:

Grafo EPS-1-3 (11 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	95,27	14,82	49,07	175,01
SA	397,04	13,18	320,37	465,31
KCKC	106,37	13,77	69,56	167,60
HZNA	256,76	16,86	160,91	305,55
AIIM	140,08	25,70	59,45	275,97
Mejora AIIM	230,98	14,05	171,08	297,12

Tabla 38: Resultados 11 canales Grafo EPS-1-3

Grafo EPS-1-3 (3 canales)				
Técnicas	Utilidad		U_{\min}	U_{\max}
	Media	CI		
Random	152,96	19,62	61,59	229,46
SA	371,72	18,33	324,48	407,85
KCKC	203,09	22,47	133,99	315,83
HZNA	230,31	13,37	154,84	272,76
AIIM	177,02	18,16	123,58	261,21
Mejora AIIM	258,17	10,36	218,29	298,99

Tabla 39: Resultados 3 canales Grafo EPS-1-3

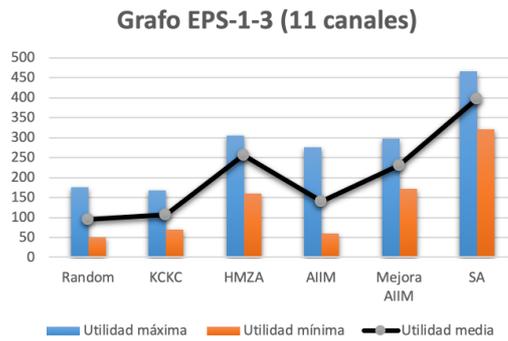


Figura 95: Resultados 11 canales Grafo EPS-1-3

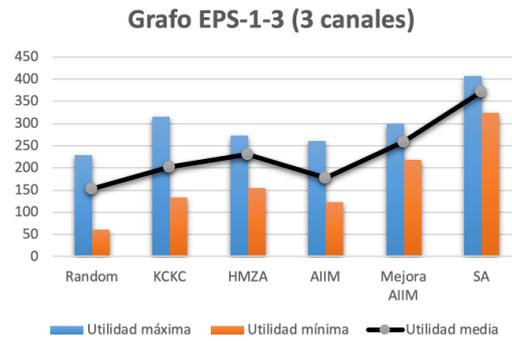


Figura 96: Resultados 3 canales Grafo EPS-1-3

Conclusiones obtenidas

Viendo los resultados obtenidos podemos obtener de ellos las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se puede verificar que los resultados obtenidos con las técnicas implementadas se encuentran entre los límites que definimos anteriormente, es decir, entre los logrados con las técnicas Random (límite inferior) y SA (límite superior).
- En segundo lugar, podemos establecer una clasificación de los algoritmos en función del rendimiento logrado. Esta clasificación se hará en orden creciente:
 - KCKC en general es con el que se obtienen unos rendimientos más bajos de la red, esto puede ser debido a que utiliza únicamente la información obtenida mediante los mensajes de control enviados.
 - AIIM obtiene unos valores de rendimiento ligeramente superiores a los obtenidos por KCKC, esto es por que la técnica de AIIM se basa en mejorar la utilización del AP en particular siempre que mejoren el rendimiento de la red.
 - HZNA obtiene en general un rendimiento notablemente superior que los dos anteriores, sobre todo cuando trabaja con 11 canales, ya que le damos una mayor variedad para la elección del canal que debe asignar a cada AP, aunque para 3 canales también obtiene rendimientos superiores. Esta mejora en los resultados es gracias a que el algoritmo busca reducir lo máximo posible la interferencia cocanal.
 - La mejora de AIIM es la que obtiene los mejores rendimientos en la mayoría de los grafos analizados, esto se debe a que tiene en cuenta las utilidades de todo el cluster, esto es, tanto APs como clientes y se basa en maximizar las utilidades particulares y la general de forma cíclica, consiguiendo así los mejores valores del rendimiento de la red entre las distintas técnicas que se han implementado.
- Por último, podemos observar como la mejora que se realizó sobre el algoritmo propuesto por Abeysekera et al. en la mayoría de los grafos obtiene unos rendimientos del 150% sobre los que consigue el mecanismo original, por lo que es una propuesta muy interesante.

Conclusiones finales

Este trabajo consistía en implementar alguna de las técnicas de asignación de canales más recientes propuestas en la literatura científica, las técnicas elegidas han sido KCKC propuesta por Kwon en al. [11], HMZA propuesta por Handrizal en al. [9] y AIIM propuesta por Abeysekera et al. [10], para una posterior comparación entre ellas y dos técnicas que se utilizarán como referentes, estas son Random y SA, que serán referencia inferior y superior respectivamente.

Como hemos podido comprobar, tras la ejecución de las distintas técnicas sobre los mismos grafos, los resultados son los esperados. Las utilidades se encuentran en el intervalo comprendido entre los valores conseguidos con Random y los obtenidos con SA.

Algo a destacar de las utilidades que se obtienen en función de la técnica utilizada para la asignación de canales es que dependen del número de canales con el que trabajemos, esto es porque algunos algoritmos se basan en el estudio de todos los canales, y por tanto, cuanto mayor es el número de canales con los que trabajamos, mejor elección se podrá hacer ya que hay más posibilidades, mientras que otras técnicas se apoyan más en evitar la interferencia cocanal para conseguir un mayor rendimiento de la red.

A continuación vamos a tener en cuenta dos situaciones distintas para la comparación de los distintos resultados. Estas situaciones son las siguientes:

- **Situación 1:** Comparación general de los resultados obtenidos con las distintas técnicas implementadas sin tener en cuenta el número de canales utilizados.
 - Las técnicas que mejores resultados han obtenidos por orden creciente en cuanto al rendimiento de la red en general son los siguientes:
 - Random, KCKC, AIIM, HMZA y SA.
- **Situación 2:** Comparación general de los resultados obtenidos con una misma técnica implementada teniendo en cuenta el número de canales utilizados.
 - Las técnicas que han obtenido mejores resultados con el uso de los 11 canales en lugar de utilizar los 3 canales no superpuestos (Canales 1, 6 y 11) en cuanto al rendimiento de la red en general son los siguientes:
 - Random, KCKC, AIIM.
 - Las técnicas que han obtenido resultados similares tanto con el uso de los 3 canales no superpuestos (Canales 1, 6 y 11) como con el uso de los 11 canales en cuanto al rendimiento de la red en general son los siguientes:
 - HMZA y SA.

Algo que ha resultado sugerente tras el análisis y la implementación de la técnica AIIM ha sido proponer una mejora del algoritmo que proponen Abeysekera et al., ya que a priori, cuantos más elementos de la red tengamos en cuenta, mejores valores de utilidad deberíamos obtener, para ello, la propuesta que se ha hecho es trabajar con los cluster en lugar de únicamente con los APs, y tras la obtención de los resultados, se puede corroborar que la mejora propuesta es interesante.

Como se puede comprobar en el apartado de resultados, para la *Situación 1*, esta propuesta del uso del cluster no sólo supera los rendimientos obtenidos con AIIM, sino que también mejora en general los rendimientos obtenidos con el resto de las técnicas implementadas. Para la *Situación 2*, los resultados con esta mejora obtiene mejores resultados con el uso de los 3 canales no superpuestos (Canales 1, 6 y 11).

En cuanto a la *Situación 1*, se obtiene ese orden en función del rendimiento debido a que:

- Random, como era de esperar, es la técnica que obtiene peores resultados, ya que no tiene en cuenta ningún factor y, por tanto, la asignación realizada es completamente aleatoria.
- KCKC es la técnica que peores rendimientos de la red obtiene debido a que únicamente analiza los mensajes de control para extraer todo tipo de información necesaria para realizar la asignación de canales.
- AIIM obtiene rendimientos de la red ligeramente superiores a los que consigue KCKC ya que esta técnica tiene en cuenta las utilidades de todos los APs en particular y la del grafo en particular, que corresponde a la suma de las utilidades de los APs.
- HZNA consigue rendimientos notoriamente superiores, en particular cuando trabaja con los 11 canales, debido a que tiene mayor número de canales a elegir y se basa en asignar el menor número posible de canales.
- Mejora propuesta de AIIM es la técnica implementada que mejores rendimientos de la red consigue, esto es debido a que es el algoritmo que más parámetros y elementos tiene en cuenta para realizar la asignación de canales.
- SA, como era de esperar, es la técnica que obtiene mejores resultados debido a que se basa en la negociación de diversas propuestas de asignación de canales y es un algoritmo codicioso ya que trata de salir de un local óptimo, todo lo contrario a los optimizadores codiciosos.

En cuanto a la *Situación 2*, se obtienen mejores resultados del rendimiento de la red con el uso de los 3 canales no superpuestos (Canales 1, 6 y 11) debido a que tanto Random como KCKC como AIIM como la mejora propuesta se basan más en evitar la interferencia cocanal, mientras que las técnicas que obtienen mejores resultados del rendimiento de la red con el uso de los 11 canales como son HMZA y SA es debido a que lo que persiguen es la reducción de interferencias en general.

Por todo esto, se puede concluir con que las técnicas que se han implementado logran obtener unos valores coherentes de la utilidad de la red y la mejora propuesta al algoritmo AIIM produce unos mejores rendimientos de la red que el resto de las técnicas, por lo que estamos ante una propuesta interesante en este tema tan complejo como es el de conseguir la mayor eficiencia del espectro de frecuencias de 2,4 GHz.

Pliego de condiciones

Lo primero que vamos a mencionar son los distintos materiales que se han utilizado para la realización del proyecto, posteriormente mencionaremos las distintas tareas realizadas para conseguir el resultado final siguiendo por un diagrama de Gantt sobre la organización de las distintas tareas realizadas (definidas en días) y su posterior aclaración en cuanto a las horas empleadas para tener un control más realista acerca del tiempo necesario para la realización y finalmente se detallarán los presupuestos del proyecto incluyendo los costes materiales y la mano de obra.

Condiciones de material y equipos

En cuanto a los materiales que se han utilizado para la realización del proyecto vamos a destacar que podemos organizarlos dentro de cuatro grandes grupos para tener una mayor aclaración y ordenación de los mismos. Estos cuatro grupos globales con sus correspondientes especificaciones sobre los materiales utilizados en cada uno de ellos y la utilidad que se los ha dado a cada uno son los siguientes:

Los materiales que se han utilizado en el proyecto se pueden incluir en cuatro grandes bloques:

- Material hardware:
 - Ordenador portátil macBook Pro como herramienta principal de trabajo.
 - Monitor LG, ratón y teclado como soporte para comodidad de trabajo.
- Material software:
 - Anaconda Navigator como entorno de desarrollo (Spyder y librerías internas destacando NetworkX y NumPy).
 - Python como lenguaje de programación para la implementación de los scripts. (En su versión 2.7).
 - Microsoft Office para la redacción de la memoria, realización de la presentación y del diagrama de Gantt. (Microsoft Office Word, Microsoft Office Power Point y Microsoft Office Excel).
 - Adobe Acrobat Reader para lectura de artículos en formato *.pdf.
- Material de oficina:
 - Conexión a internet para búsqueda de todo tipo de información y descarga de software.
 - Papel, tinta, impresora y encuadernador para la impresión de la documentación y de la memoria del proyecto.
 - Papel y bolígrafos para plasmado de ideas y ayuda en la implementación de las técnicas.
- Mano de obra:
 - Personal para la realización del proyecto.

Condiciones de ejecución

Las distintas fases seguidas en el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado por orden cronológico son las siguientes:

- Instalación del software a utilizar como son Anaconda Navigator, Spyder, Python, NetworkX, NumPy, ...
- Familiarización con los entornos de desarrollo.
- Búsqueda de información global sobre el tema elegido.
- Lectura detallada y comprensión de los artículo [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] y [13] y más a fondo de los artículos [9], [10], [11], [12].
- Consulta de la documentación del lenguaje de programación Python [14], NetworkX [15] y NumPy [16].
- Análisis de las funciones proporcionadas como por ejemplo, la función de utilidad.
- Experimentación y análisis de los grafos de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares.
- Lectura comprensiva y detallada de diferentes técnicas de asignación de canales y elección de técnicas a implementar: KCKC [11], HMZA [10] y AIIM [9].
- Implementación del algoritmo KCKC.
- Ejecución del algoritmo KCKC.
- Anotar resultados obtenidos con el algoritmo KCKC.
- Implementación del algoritmo AIIM.
- Ejecución del algoritmo AIIM.
- Anotar resultados obtenidos con el algoritmo AIIM.
- Implementación del algoritmo HZNA.
- Ejecución del algoritmo HZNA.
- Anotar resultados obtenidos con el algoritmo HZNA.
- Análisis, contraste y validación de los resultados obtenidos con las diferentes técnicas implementadas.
- Búsqueda de información y redacción de la memoria del presente Trabajo de Fin de Grado.
- Realización de la presentación.

El diagrama de Gantt del proyecto sería el siguiente, en el que observar los tiempos de las tareas y el inicio y final de las mismas, otra cosa importante es el paralelismo de algunas de las tareas, ya que para avanzar en el proyecto algunas de las tareas debían realizarse al mismo tiempo.

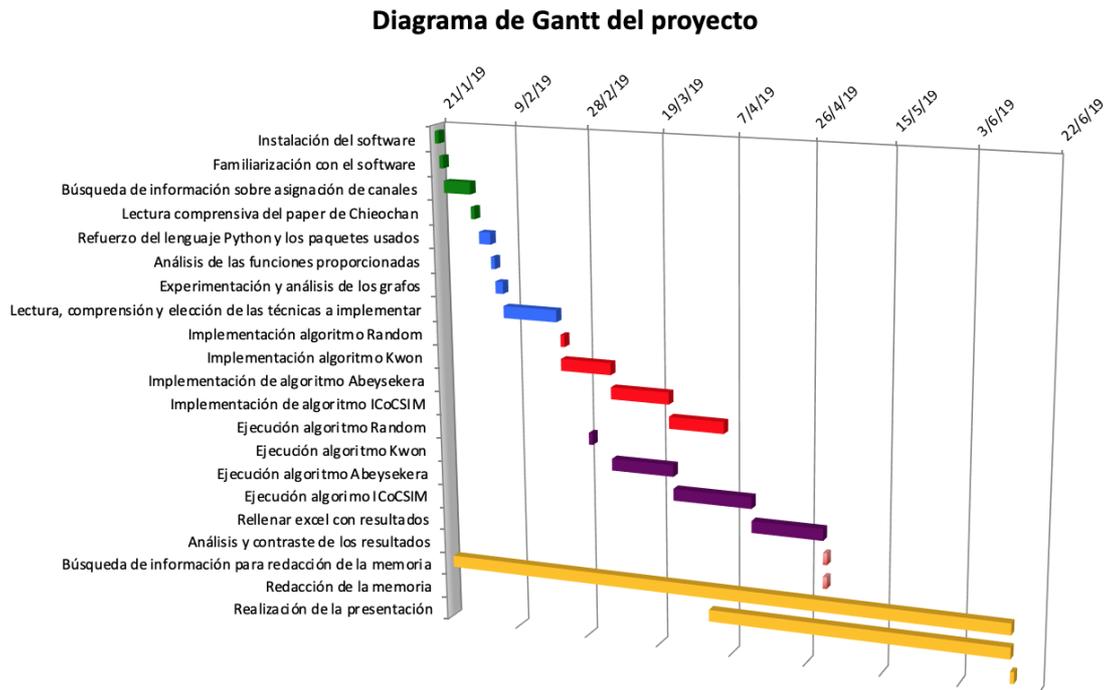


Figura 97: Diagrama de Gantt del proyecto

En este diagrama de Gantt podemos diferenciar claramente 6 colores, que representan la globalización de las tareas realizadas. El esquema de tareas globales y concretas queda de la siguiente manera:

- Tareas de introducción al software y al tema del proyecto:
 - Instalación del software.
 - Familiarización con el software.
 - Búsqueda de información sobre asignación de canales.
 - Lectura comprensiva de [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] y [13].
- Tareas concretas del estudio de funciones, lenguaje y algoritmos a implementar:
 - Refuerzo del lenguaje Python y los paquetes usados.
 - Análisis de las funciones proporcionadas.
 - Experimentación y análisis de los grafos.
 - Lectura, comprensión y elección de las técnicas a implementar.
- Tareas de implementación de los algoritmos:
 - Implementación de Random, KCKC, AIIM y HZNA.
- Tareas de ejecución de los algoritmos implementados:
 - Ejecución de Random, KCKC, AIIM y HZNA.
- Tareas de análisis y validez de resultados.
- Tareas de redacción:
 - Búsqueda de información, redacción de memoria y realización de la presentación.

El tiempo visto en días puede ser muy confuso, ya que, depende mucho de las horas que se empleen cada día, por tanto, en la siguiente tabla veremos las horas empleadas en la realización de cada tarea:

Nombre de la tarea	Horas empleadas
Instalación del software	2 horas
Familiarización con el software	1 horas
Búsqueda de información sobre asignación de canales	1 horas
Lectura comprensiva del paper de Chieochan	1 horas
Refuerzo del lenguaje Python y los paquetes usados	1 horas
Análisis de las funciones proporcionadas	2 horas
Experimentación y análisis de los grafos	1 horas
Lectura, comprensión y elección de las técnicas a implementar	20 horas
Implementación algoritmo Random	0,5 horas
Implementación algoritmo Kwon	62 horas
Implementación de algoritmo Abeysekera	76 horas
Implementación de algoritmo ICoCSIM	71 horas
Ejecución algoritmo Random *	0,2 horas
Ejecución algoritmo Kwon *	384 horas
Ejecución algoritmo Abeysekera *	480 horas
Ejecución algoritmo ICoCSIM *	432 horas
Rellenar Excel con resultados	0,1 horas
Análisis y contraste de los resultados	0,2 horas
Búsqueda de información para redacción de la memoria	55 horas
Redacción de la memoria	60 horas
Realización de la presentación	1 horas
Total de horas del proyecto **	1651 horas

Tabla 40: Tareas realizadas y horas empleadas

*El tiempo de ejecución de los algoritmos incluye tanto para 3 como para 11 canales.

** En las horas totales reales del proyecto habría que restar las horas de las ejecuciones, ya que mientras tanto se realizaban otras tareas y las horas correspondientes a la búsqueda de información para la redacción de la memoria, ya que esta tarea engloba otras tareas descritas en las que se realizaba ya este trabajo.

Cabe destacar que podemos tener varias situaciones importantes en cuanto al tiempo de realización del proyecto teniendo en cuenta el hardware descrito y que únicamente hay una persona realizando las distintas tareas. Estas son las siguientes:

- **Situación 1:** Para conseguir el tiempo real de la obtención del trabajo con resultados habría que restar a las horas totales el número de horas correspondientes a la búsqueda de información para la redacción de la memoria ya que estas horas está ya contabilizadas algunas de las tareas descritas como se dijo anteriormente. El total de horas empleadas es de **1596 horas**.
- **Situación 2:** Para conseguir el tiempo real de la obtención del trabajo sin resultados, esto es, el tiempo de trabajo del personal, habría que restar a las horas totales el número de horas correspondientes a la ejecución de los algoritmos y a la búsqueda de información para la redacción de la memoria ya que estas horas está ya contabilizadas algunas de las tareas descritas como se dijo anteriormente. El total de horas empleadas es de **300 horas**.
- **Situación 3:** Para conseguir el tiempo total de la obtención del trabajo con resultados que aparece en la *Tabla 40* habría sumar las horas de las distintas tareas, en esta situación no se tiene en cuenta que la búsqueda de información para la redacción de la memoria ya se ha desarrollado con otras tareas, por tanto no sería nada real. Esta situación es la que aparece detallada en la tabla de tareas. El total de horas empleadas es de **1651 horas**.

Presupuesto

Para los presupuestos del proyecto se van a diferenciar los cuatro grandes grupos de materiales que se detallaron anteriormente. En cuanto a la mano de obra, tendremos en cuenta la primera situación pero diferenciando dos costes de mano de obra. El presupuesto de la realización del proyecto es el siguiente:

- Material hardware (con IVA):

Material	Precio
Ordenador portátil macBook pro	1.505,59 €
Monitor UltraFine 4k de LG	749,00 €
Teclado Magic Keyboard	149,00 €
Ratón Magic Mouse 2	99,00 €

Tabla 41: Presupuesto material hardware

- Material software (con IVA):

Material	Precio
Microsoft Office	299,99 €

Tabla 42: Presupuesto material software

- Material de oficina (con IVA):

Material	Precio
Paquete de folios y bolígrafos	18,14 €

Tabla 43: Presupuesto material de oficina

- Mano de obra (sin IVA):

Material	Precio/hora	Horas	Precio Total
Mano de obra general	52 €/hora	300 horas	15.600,00 €
Mano de obra ejecución	10 €/hora	1296 horas	12.960,00 €

Tabla 44: Presupuesto mano de obra

En cuanto al presupuesto final del proyecto, tendremos en cuenta que la amortización del material hardware será de 3 años, por lo que en los 5 meses de duración el coste asociado al proyecto es de 347,59 €, mientras que el material software corresponde a la licencia anual, por tanto, el coste asociado al proyecto es de 125,00 €.

El presupuesto final desglosado sin IVA sería el siguiente:

Material	Precio
Material Hardware	347,59 €
Material Software	125,00 €
Material de oficina	18,14 €
Mano de obra	28.560,00 €
Presupuesto Total (sin IVA)	29.050,73 €

Tabla 45: Presupuesto total sin IVA

El presupuesto final desglosado con el 10% de IVA sería el siguiente:

Material	Precio
Material Hardware	347,59 €
Material Software	125,00 €
Material de oficina	18,14 €
Mano de obra	28.560,00 €
IVA (10%)	2.856,00 €
Presupuesto Total (con IVA)	31.906,73 €

Tabla 46: Presupuesto total con IVA

Referencias bibliográficas

- [1] Nonlinear negotiation approaches for complex-network optimization: a study inspired by Wi-Fi channel assignment. I Marsa-Maestre, E de la Hoz, JM Gimenez-Guzman, D Orden, M Klein. *Group Decision and Negotiation* 28 (1), 175-196. 2019.
- [2] Spectrum graph coloring to improve Wi-Fi channel assignment in a real-world scenario via edge contraction. D Orden, I Marsa-Maestre, JM Gimenez-Guzman, E de la Hoz, Ana Alvarez-Suarez. *Discrete Applied Mathematics*. 2019.
- [3] A Coral Reefs Optimization algorithm with substrate layer for robust Wi-Fi channel assignment. C Camacho-Gómez, I Marsa-Maestre, JM Gimenez-Guzman, Sancho Salcedo-Sanz. *Soft Computing*, 1-20. 2019.
- [4] Spectrum graph coloring and applications to Wi-Fi channel assignment. D Orden, J Gimenez-Guzman, I Marsa-Maestre, E de la Hoz. *Symmetry* 10 (3), 65. 2018.
- [5] Multi-agent nonlinear negotiation for Wi-Fi channel assignment. E De La Hoz, I Marsa-Maestre, JM Gimenez-Guzman, D Orden, M Klein. *Proceedings of the 16th AAMAS Conference*. 2017.
- [6] On the goodness of using orthogonal channels in WLAN IEEE 802.11 in realistic scenarios. JM Gimenez-Guzman, I Marsa-Maestre, D Orden, E de la Hoz, T Ito. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018.
- [7] Automated negotiation for resource assignment in wireless surveillance sensor networks. E de la Hoz, J Gimenez-Guzman, I Marsa-Maestre, D Orden. *Sensors* 15 (11), 29547-29568. 2018.
- [8] CACAO: Distributes Client-Assisted Channel Assignment Optimization for Uncordinated WLANs. Xiaonan Yue, Chi-Fai Michael Wong, and Shueng-Han Gary Chan. *IEEE Transactions on parallel and distributed systems* Vol.22, n°.9. 2011.
- [9] An Improved of Channel Allocation for WLAN Using Vertex Merge Algorithm. Handrizal, Muhammad Zarlis, A. Noraciah, Ahmed N. Abdalla. *Internacional Conference on Computational Science and Information Management (ICoCSIM)* Vol.1, 205-213. 2012.
- [10] Network-controlled Channel Allocation Scheme for IEEE 802.11 Wireless LANs: Experimental and Simulation Study. B. A. Hirantha Sithira Abeysekera, Koichi Ishihara, Yasuhiko Inoue, and Masato Mizoguchi. *NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation, Yokosuka, 239-0847*. 2014.
- [11] Distributed channel selection scheme based on the number of interfering stations in WLAN. Young Min Kwon, Kyung Choi, Mihui Kim, Min Young Chung. *El sevier, Ad Hock Networks*, 39, 45-55. 2016.
- [12] Channel Assignment Schemes for Infrastructure-Based 802.11 WLANs: A Survey. Surachai Chieochan, Ekram Hossain, and Jeffrey Diamond. *IEEE Communications Surveys and Tutorials* Vol.12, n°.1. 2010.
- [13] Method and Apparatus for Least Congested Channel Scan for Wireless Access Point. Achanta M. *U.S. Patent Application*. 10/959,446. 2006.

- [14] Documentación Python: <https://docs.python.org/2.7/>
- [15] Documentación NetworkX: <https://networkx.github.io/documentation/networkx-1.11/>
- [16] Documentación NumPy: <https://docs.scipy.org/doc/numpy-1.15.4/user/>
- [17] Documentación Anaconda Navigator: <https://docs.anaconda.com/anaconda/navigator/>
- [18] Documentación Spyder: <https://www.spyder-ide.org>
- [19] Google académico: <https://scholar.google.es>
- [20] Foro de dudas en inglés: <https://stackoverflow.com>
- [21] Foro de dudas en español: <https://es.stackoverflow.com>
- [22] Diagrama de Gantt: <https://es.smartsheet.com/blog/donde-puede-encontrar-las-mejores-plantillas-del-diagrama-de-gantt#Excel>
- [23] Redes de computadoras: Un enfoque decente. Jim Kurose, Keith Ross. *Pearson Educación* 5ª Edición. 2010.
- [24] Consulta normativa: <http://escuelapolitecnica.uah.es/estudiantes/trabajo-fin-grado.asp>
- [25] Consulta información: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html#legacy>
- [26] Consulta información: <http://recursostic.educacion.es>
- [27] Consulta información: <https://uniwebsidad.com/>



Universidad
de Alcalá