

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

Sistema de clasificación automática de escenarios de redes
inalámbricas para su optimización

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Sandra Machado Zurita

Tutor: Luis de la Cruz Piris

2023

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

**Sistema de clasificación automática de escenarios de redes
inalámbricas para su optimización.**

Autora: Sandra Machado Zurita

Tutor: Luis de la Cruz Piris

Tribunal:

Presidente: Bernardo Alarcos Alcázar

Vocal 1º: Lucas Cuadra Rodríguez

Vocal 2º: Antonio García Herraiz

Fecha de depósito: 10 de julio de 2023

A mi mamá, que siempre está y a Ryan, que sin él no fuera posible.

“Todo está dicho ya, pero las cosas cada vez que son sinceras son nuevas.”
José Martí

Agradecimientos

*No es lo que decimos o pensamos lo que nos define, es
lo que hacemos.*

Jane Austen

Este trabajo es el resultado de muchas horas de trabajo, tanto de la autora como del tutor. Ha sido un largo y desafiante camino con varias versiones de desarrollo las cuales aportaron nuevas habilidades.

En primer lugar, quiero agradecer al tutor y profesores académicos. Su orientación fue fundamental para que pudiera adquirir los conocimientos necesarios y desarrollar mis habilidades de investigación.

También me gustaría expresar mi gratitud a mis compañeros de clase. El intercambio de ideas han enriquecido enormemente mi experiencia de aprendizaje. A través de debates y proyectos conjuntos, he podido ampliar mis horizontes y ver diferentes perspectivas. Aprecio el apoyo mutuo y el espíritu de equipo que hemos compartido durante este tiempo.

Agradezco a mi familia y amigos, quienes me han apoyado durante el trayecto de este Máster. Sus palabras de aliento, comprensión y paciencia han sido un motor para mí. Gracias por creer en mí, por darme las fuerzas para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Resumen

En comparación a las redes cableadas, las inalámbricas tienen que afrontar mayores dificultades debido a su propia naturaleza. Como ejemplo de ello vemos que: utilizan medios de transmisión no guiados lo que las hace más vulnerables frente a interferencias; el carácter de movilidad de los dispositivos que se emplean en las redes inalámbricas trae como consecuencia que se vean limitadas por el consumo energético; la intensidad decreciente de la señal y la propagación multitrayecto también son desafíos que presentan estas redes. Además, la tasa de error de bits es mayor que las que presentan las redes cableadas y esta a su vez puede variar en el tiempo. Debido a estas características es preciso trabajar constantemente en su optimización. Nuestro trabajo pretende establecer mecanismos de comparación entre estructuras de redes con el objetivo de aplicar configuraciones óptimas predefinidas y ahorrar tiempos de simulación y capacidad de cómputo ante el advenimiento de una nueva estructura que se precise mejorar. Para definir estas técnicas es necesario abstraer los escenarios WiFi a comparar, utilizando para ello los grafos. En este trabajo se proponen mecanismos de comparación basados en técnicas para discretizar los escenarios y utilizando los radios de cobertura de los puntos de acceso. Las propuestas realizadas se validan utilizando el simulador de redes “**ns-3**” a través de la definición de escenarios sintéticos con diferentes grados de complejidad.

Palabras clave: redes inalámbricas, WiFi, grafo, optimización, simulación, técnicas de comparación.

Abstract

Compared to wired networks, wireless networks face more significant difficulties due to their own nature. As an example, we see that they use unguided transmission media, which makes them more vulnerable to interference. The mobile nature of devices used in wireless networks results in limitations due to power consumption. Challenges such as decreasing signal intensity and multipath propagation are also present in these networks. Furthermore, the bit error rate is higher than in wired networks and can vary over time. Due to these characteristics, constant work is required to optimize wireless networks. Our work aims to establish comparison mechanisms between network structures in order to apply predefined optimal configurations and save simulation time and computing capacity when dealing with a new structure that needs improvement. To define these techniques, it is necessary to abstract the WiFi scenarios to be compared, using graphs for that purpose. This work proposes comparison mechanisms based on techniques to discretize the scenarios and utilize the coverage ranges of access points. The proposed approaches are validated using the network simulator “**ns-3**” by defining synthetic scenarios with varying levels of complexity.

Keywords: wireless networks, WiFi, graph, optimization, simulation, comparison techniques.

Resumen extendido

En comparación a las redes cableadas, las inalámbricas tienen que afrontar mayores dificultades debido a su propia naturaleza. Como ejemplo de ello se puede enunciar que estas redes utilizan medios de transmisión no guiados, los cuales son más vulnerables frente a interferencias. Otro factor importante es el carácter de movilidad de los dispositivos que se emplean en las redes inalámbricas, lo que trae como consecuencia que se vean limitadas por el consumo energético. Otras de las diferencias entre las redes cableadas y las inalámbricas y a las cuales estas últimas se deben enfrentar son la intensidad decreciente de la señal; la propagación multitrayecto ocurre también, dado que partes de la onda electromagnética se reflejan en los objetos y en el suelo, tomando caminos de diferentes distancias entre un emisor y un receptor. Además, la tasa de error de bits es mayor que las que presentan las redes cableadas y esta a su vez puede variar en el tiempo [1]. También en las redes inalámbricas existe el problema de la “estación oculta”, este en conjunto con el desvanecimiento hacen que el acceso múltiple en una red inalámbrica sea más complejo que en una red cableada, además se hace necesario implementar en ellas mecanismos más robustos, como por ejemplo, potentes Códigos de Redundancia Cíclica (CRC, por sus siglas en inglés) para la detección de errores y protocolos de la capa de enlace con transferencia de datos fiable que se encarguen de retransmitir las tramas corruptas.

Por ende, resulta imperativo continuar con el desarrollo y la optimización de las redes inalámbricas, en particular aquellas que se alinean con el estándar 802.11 (WiFi), debido a su carácter imprescindible en el uso diario. Las redes inalámbricas (específicamente el estándar 802.11) poseen varios modos de funcionamiento, como son el modo de infraestructura y modo ad-hoc. En este trabajo los estudios se realizarán empleando siempre el modo infraestructura.

Debido a las limitantes antes enunciadas que poseen las redes inalámbricas, es preciso trabajar en su optimización en diferentes aspectos según los objetivos que se estén buscando, como pueden ser reducir las interferencias para aumentar el rendimiento o mejorar el consumo energético de los dispositivos. Diversas técnicas de optimización han mostrado obtener resultados positivos en este contexto, sin embargo, uno de los retos que presentan estas técnicas de optimización es reducir el tiempo para obtener una solución válida ante cambios en la red. Los algoritmos de optimización de redes inalámbricas más comunes, actúan de forma general sobre escenarios estáticos donde las condiciones de los mismos no varían, buscando la mejor configuración para cada caso.

En este trabajo fin de máster se pretende estudiar y desarrollar una solución que permita comparar escenarios de redes inalámbricas, principalmente basadas en redes 802.11, estableciendo si soluciones óptimas obtenidas previamente para un escenario tipo son aplicables a nuevos escenarios. Para ello se definen varias técnicas o mecanismos que primeramente posibiliten la abstracción de estos escenarios WiFi, generalmente como grafos, los cuales son convertidos en matrices según las necesidades. Estas abstracciones aportan la ventaja de llegar a resultados mediante cálculos matemáticos o estadísticos, los cuales presentan una gran facilidad de comprensión. Es preciso definir el concepto de grafo para trabajar correctamente con estos. Los resultados de cada técnica desarrollada en este trabajo serán validados

mediante simulaciones de los mismos grafos utilizados previamente, con el software “**ns-3**”. Con todo esto lo que se pretende obtener es que, a partir de un conjunto de escenarios generados de forma sintética y optimizados, se pueda elegir de forma rápida qué configuración aplicar a un escenario que cambiará de forma dinámica.

Objetivos del trabajo

Según lo expuesto anteriormente, se puede definir como hipótesis de este trabajo la posibilidad de desarrollar y aplicar técnicas de abstracción de escenarios de redes inalámbricas basadas en redes 802.11 utilizando grafos para comparar y evaluar la aplicabilidad de soluciones obtenidas previamente en escenarios similares. Además, al validar los resultados mediante simulaciones utilizando el software “**ns-3**”, se podrá determinar la eficacia de las técnicas desarrolladas. Con este enfoque se espera lograr una selección rápida y óptima de configuraciones en escenarios dinámicos mediante el uso de un conjunto de escenarios generados previamente. Partiendo de dicha hipótesis se logra establecer como objetivo principal estudiar y desarrollar una solución que permita comparar escenarios de redes inalámbricas, principalmente basadas en redes 802.11, estableciendo si soluciones obtenidas previamente para un escenario tipo son aplicables a nuevos escenarios. Para abordar este objetivo es necesario desglosar objetivos específicos:

- Estudiar los escenarios de redes WiFi.
- Definir e implementar técnicas de comparación de escenarios.
- Validar las técnicas propuestas a través de la simulación de los escenarios WiFi.
- Desarrollar una interfaz de usuario para acceder de forma sencilla a las técnicas implementadas.

El desarrollo de cada uno de estos objetivos secundarios contribuirá a alcanzar el objetivo principal del trabajo y corroborar mediante los resultados obtenidos la veracidad o no de la hipótesis planteada.

Nuestro trabajo pretende establecer mecanismos de comparación entre estructuras de redes con el objetivo de aplicar configuraciones óptimas predefinidas y ahorrar tiempos de simulación y capacidad de cómputo ante el advenimiento de una nueva estructura que se precise mejorar.

Las estructuras de redes que son objeto de estudio se representarán mediante grafos, donde sus nodos poseen dos tipos de clasificación (APs o clientes), en función de ello poseerán características propias de estos elementos reales en una red WiFi, en el caso de los APs la ubicación espacial y los clientes que tiene asociados y para los STA su ubicación espacial y el AP al que pertenecen; ambos tipos de nodos se etiquetan e identifican por nombre y tipo. Los enlaces entre los nodos también se clasifican en dependencia de su origen y destino, en este caso pueden ser enlaces de señal o interferentes; los enlaces de señal solo van de AP a cliente, donde un solo AP puede darle servicio a un cliente específico. Los enlaces entre STA-STA, STA-AP y entre AP-AP son considerados interferencias. La ecuación que describe la relación para dichos grafos es la enunciada en 1, es la combinación sin repeticiones del total de nodos tomados de dos en dos (transmisor y receptor), lo planteado queda expresado en la siguiente ecuación:

$$Total_de_enlaces = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (1)$$

Siendo n la cantidad de nodos totales (APs + STA) y r la cantidad de elementos tomados en cada combinación.

Un ejemplo simplificado de un grafo en representación de una red WiFi se puede observar en la figura 2.

Las propuestas que se emplearán son las enunciadas a continuación:

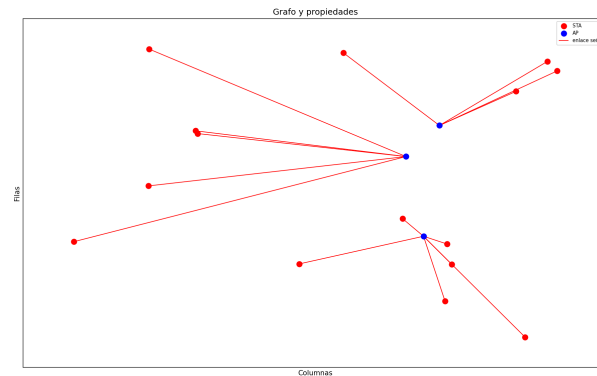


Figura 2: Estructura de red WiFi simplificada mediante grafos.

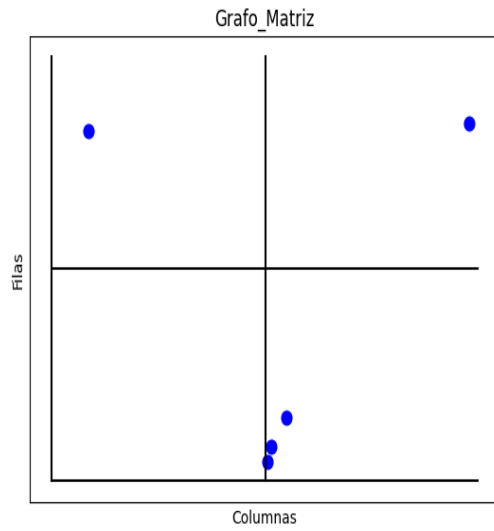
- Discretización del escenario.
- Clasificación por radio de cobertura de los APs.

Para el desarrollo del primer método, fue necesario evaluar el grafo, analizar los clientes y los APs, aunque los grafos creados de la base de datos poseen la misma cantidad de APs y en las mismas posiciones, para un futuro grafo de entrada con variaciones en ambos tipos de nodos si pudiese ser preciso el uso de los dos análisis. Con estos datos se abstraio el grafo a una matriz mediante herramientas de python, luego la matriz es dividida según resoluciones preestablecidas. Esto se realiza tanto para el grafo a evaluar como para el conjunto con el que se comparará. Para analizar la similitud entre cada pareja de grafo se restan esas matrices obteniendo una llamada “matriz diferencia”, por lo que existirá una matriz diferencia para cada una de las resoluciones empleadas por cada pareja de grafos que se compare.

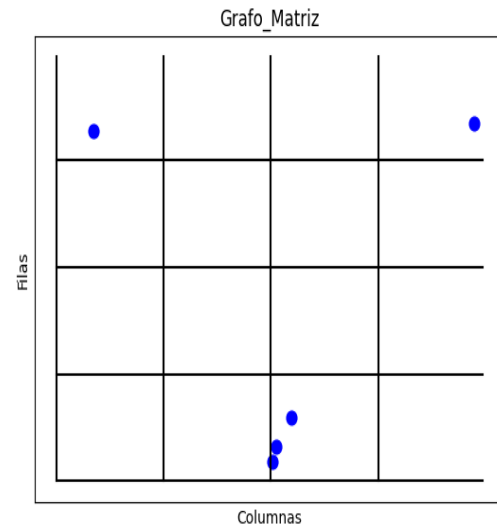
De la “matriz diferencia” se obtienen un grupo de métricas para establecer la mayor similitud del grafo de entrada con el conjunto de la base de datos que se comparó. En este caso se utilizan la suma de los valores absolutos de cada uno de los nodos de la matriz diferencia, se aplica una normalización a ceros y unos donde si la resta entre cada píxel es menor igual que 3 se pone a cero y si es mayor a 1, luego se hace el sumatorio de esta matriz. La moda del resultado de la “matriz diferencia” y la media de la misma también se aplicarán, donde se establecerá una comparación visual de los resultados. En base a los menores valores obtenidos (la moda con resultado cero o uno y la media, valor absoluto, valor normalizado y desviación típica) y en función de las resoluciones se obtendrá una similitud mayor en una pareja de grafos sobre las demás que nos servirá para afirmar que la configuración óptima del escenario base sirve de igual manera o puede ser aplicada al escenario nuevo de entrada.

Para llevar a cabo la discretización de dichos escenarios se implementó un código el cual es capaz de transformar el grafo objetivo en una matriz con tamaño máximo definido por parámetros (x;y), logrando así contar los clientes por área establecida previamente según la resolución (filas,columnas) que se estime conveniente. De este modo al emplear resoluciones mayores aparecen menos clientes por unidad de área pero también es más fácil que este número se asemeje entre todos los grafos, pero posee un mayor coste computacional, un ejemplo de esta discretización se puede observar en las figuras [3a](#), [3b](#), [3c](#), [3d](#).

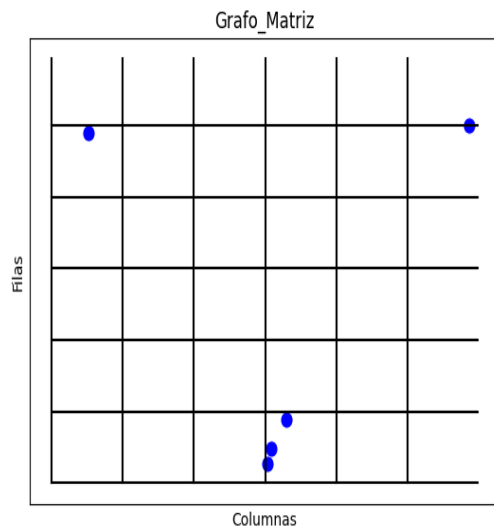
En la segunda técnica se ha trabajado en establecer la semejanza, pero desde otro punto de vista. Dado que tenemos a los APs en posiciones fijas y los clientes asociados a estos son los que van cambiando de posición en cada grafo (posiciones aleatorias), se analizan una serie de distancias de cobertura de la posición de los APs y se calculan la cantidad de clientes para cada una de esas distancias en cada AP, son comparados todos los grafos que posean la misma cantidad de clientes. Para ganar en uniformidad se estudian los mismos grafos que se emplean para la técnica anteriormente desarrollada. A continuación se evidencian los radios de cobertura de cada AP que se tuvieron en cuenta para las comparaciones.



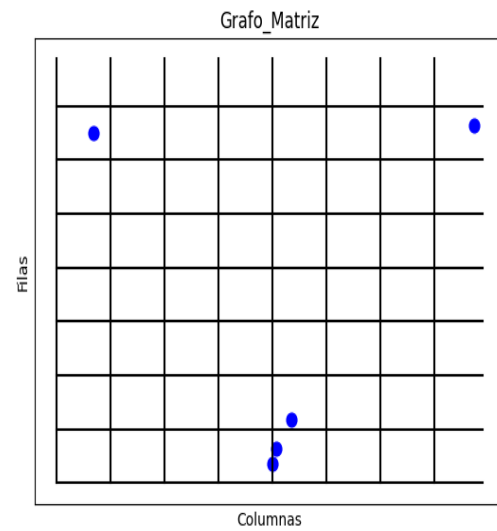
(a) Matriz de 2x2 con 5 STAs.



(b) Matriz de 4x4 con 5 STAs.



(c) Matriz de 33 con 5 STAs.



(d) Matriz de 8x8 con 5 STAs.

Figura 3: Diferencia de resoluciones en grafo con 5 clientes.

- hasta 5 metros
- entre 5 y 10 metros
- entre 10 y 15 metros
- entre 15 y 20 metros
- entre 20 y 25 metros
- entre 25 y 30 metros

Para una correcta adaptación de las técnicas propuestas, es necesario una fase de calibración que adapte los parámetros de cada una de las propuestas a las características de cada escenario, que permita

llegar a un resultado más preciso dado que se consideran en las soluciones ambos métodos. En este caso se define una ecuación que tiene en sus términos las variables a insertar por cada método donde irán desde 1 hasta 9 siendo estos los índices referentes a la pareja de grafos escogida que mayor similitud tengan. Además presentan un parámetro que multiplique a cada una de estas variables el cual les dará un peso. Para los pesos se estimarán dos variables, α y β a las cuales se les irán variando sus valores para analizar qué método tiene más relevancia o veracidad a la hora de determinar la similitud entre grafos. Esto se determinará mediante una comparación con los resultados de similitud de escenarios de las validaciones con el software “**ns-3**”. Las validaciones en este software se establecen simulando las parejas de grafos escogidas previamente, dichas simulaciones suman un total de 103 donde en el siguiente orden se varían los canales de operación para los APs, en las primeras 3 solo utilizan los canales 1, 6 y 11 respectivamente, en las siguientes 50 solo se emplean los canales ortogonales (1, 6 y 11) aleatoriamente y las últimas 50 emplean los 11 canales aleatoriamente; debido a esto los resultados exponen que las últimas 50 simulaciones (53-102) poseen mejor rendimiento y menor retardo y jitter. Los parámetros para contrastar los resultados son precisamente estos, el throughput, delay y jitter. Según los métodos empleados para los grafos del grupo “400”, el grafo más parecido al 400_0 es el 400_5 aunque a su vez el 400_6 también aporta buenos resultados y para el grupo de “600” se distingue en primer lugar el 600_1 como más parecido al 600_0 pero el 600_9 también se destaca como buena opción. Lo expuesto anteriormente está recogido en la sección 4.4.3, además de reflejarse en los anexos B. Por tanto, tras las validaciones realizadas, las técnicas propuestas cumplen con los objetivos fijados.

Índice general

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Resumen extendido	xiii
Índice general	xix
Índice de figuras	xxi
Índice de tablas	xxiii
1 Introducción	1
1.1 Objetivos y campo de aplicación	3
1.2 Estructura del trabajo	4
2 Estudio teórico	5
2.1 Técnicas de optimización en el ámbito de las Redes Inalámbricas	5
2.2 Técnicas de comparación de grafos	12
2.3 Sistemas de simulación para las validaciones”	16
3 Sistema de clasificación automática de escenarios de redes inalámbricas para su optimización	19
3.1 Modelado del escenario de redes inalámbricas	21
3.1.1 Descripción de redes inalámbricas basadas en WiFi	21
3.2 Definición del problema	22
3.2.1 Estructura para el modelado del problema	22
3.3 Sistema de clasificación automática de escenarios de redes inalámbricas para su optimización.	25
3.3.1 Discretización del escenario	25
3.3.2 Clasificación por radio de cobertura de los APs.	32
3.3.3 Fase de calibración	33

4 Experimentos y resultados obtenidos	35
4.1 Introducción	35
4.2 Entorno experimental	35
4.2.1 Bases de datos utilizadas	35
4.3 Validación	36
4.4 Resultados experimentales	37
4.4.1 Resultados según método discretización del escenario	37
4.4.2 Resultados según método clasificación por radios de cobertura de los APs	41
4.4.3 Resultados de las validaciones	42
4.4.4 Resultados obtenidos con interfaz de usuario	46
5 Conclusiones y líneas futuras	49
5.1 Conclusiones	49
5.2 Líneas futuras	50
Bibliografía	51
Apéndice A Manual de usuario	57
A.1 Introducción	57
A.2 Manual	57
A.2.1 Llamar al método Discretización del escenario	57
A.2.2 Llamar al método Radio de Cobertura de APs	58
A.2.3 Llamar a Calibración de Resultados	58
A.2.4 Llamar a Simulación en “ ns-3 ”	58
Apéndice B Tablas de resultados	59
B.1 Tablas de resultados de los métodos empleados	59
B.1.1 Discretización del escenario	59
B.1.2 Radio de Coberturas	64
B.1.3 Validaciones	69
B.1.3.1 Throughput	69
B.1.3.2 Delay	74
B.1.3.3 Jitter	79

Índice de figuras

2	Estructura de red WiFi simplificada mediante grafos.	xv
3	Diferencia de resoluciones en grafo con 5 clientes.	xvi
3.1	Tiempos de simulación para escenarios WiFi en “ ns-3 ”.	20
3.2	Estructura de red WiFi simplificada mediante grafos.	23
3.3	Representación sencilla de un grafo.	23
3.4	Estructura de red WiFi mediante grafos.	24
3.5	Diferencia de resoluciones en grafo con 5 clientes.	26
3.6	Diferencia de resoluciones en grafo con 10 clientes.	27
3.7	Diferencia de resoluciones en grafo con 15 clientes.	28
3.8	Parejas de grafos con 5 clientes a comparar.	30
4.1	Comparación de dos grafos con misma resolución 4 x 4.	37
4.2	Comparación de dos grafos con misma resolución 6 x 6.	38
4.3	Comparación de dos grafos con misma resolución 8 x 8.	38
4.4	Parejas similares resultado de comparación.	40
4.5	Parejas similares resultado de comparación.	41
4.6	Resultados con método Discretización del escenario vistos por consola.	46
4.7	Resultados con método por radio de cobertura vistos por consola.	47
4.8	Resultados con método por radio de cobertura vistos por consola (cont.).	47

Índice de tablas

1.1	Comparación entre versiones de Estándares IEEE 802.11.	2
3.1	Tiempos de ejecución de simulación de plantillas de escenarios.	20
3.2	Valores de α y β	33
4.1	Distribución de escenarios estudiados.	36
4.2	Resultados de simulaciones de parejas de grafos más parecidas en “ ns-3 ”.	43
4.3	Resultados de simulaciones de demás grafos en “ ns-3 ”.	44
4.4	Resultados de simulaciones de demás grafos en “ ns-3 ”.	44
4.5	Resultados de simulaciones de parejas de grafos más parecidas en “ ns-3 ”.	44
4.6	Resultados de simulaciones de demás grafos en “ ns-3 ”.	44
4.7	Resultados de simulaciones de demás grafos en “ ns-3 ”.	45
4.8	Resultados de simulaciones de parejas de grafos más parecidas en “ ns-3 ”.	45
4.9	Resultados de simulaciones de demás grafos en “ ns-3 ”.	45
4.10	Resultados de simulaciones de demás grafos en “ ns-3 ”.	46
B.1	Comparación de escenarios mediante su discretización.	60
B.2	Comparación de escenarios mediante su discretización.	61
B.3	Comparación de escenarios mediante su discretización.	62
B.4	Comparación de escenarios mediante su discretización.	63
B.5	Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.	65
B.6	Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.	66
B.7	Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.	67
B.8	Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.	68
B.9	Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.	70
B.10	Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.	71
B.11	Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.	72
B.12	Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.	73
B.13	Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.	75
B.14	Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.	76

B.15 Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.	77
B.16 Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.	78
B.17 Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.	80
B.18 Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.	81
B.19 Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.	82
B.20 Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.	83

Capítulo 1

Introducción

El secreto para salir adelante es comenzar.

Mark Twain

La comunicación entre personas o entre estas y los servicios a través de Internet se ha convertido en un elemento básico a nivel global. En los últimos años las redes de ordenadores han dado un giro en la preferencia y empleo de las redes inalámbricas sobre las redes cableadas, según afirman [2]-[4]. En comparación a las redes cableadas, las inalámbricas tienen que afrontar mayores dificultades debido a su propia naturaleza. Como ejemplo de ello se puede enunciar que estas redes utilizan medios de transmisión no guiados, los cuales son más vulnerables frente a interferencias. Otro factor importante es el carácter de movilidad de los dispositivos que se emplean en las redes inalámbricas, lo que trae como consecuencia que se vean limitadas por el consumo energético.

Otras de las diferencias entre las redes cableadas y las inalámbricas y a las cuales estas últimas se deben enfrentar son la intensidad decreciente de la señal dado que la radiación electromagnética se atenúa a medida que va atravesando la materia como consecuencia de incrementar la distancia entre el transmisor y el receptor. La propagación multitrayecto ocurre también, dado que partes de la onda electromagnética se reflejan en los objetos y en el suelo, tomando caminos de diferentes distancias entre un emisor y un receptor. Además, la tasa de error de bits es mayor que las que presentan las redes cableadas y esta, a su vez, puede variar en el tiempo [1]. También en las redes inalámbricas existe el problema de la “estación oculta”, este en conjunto con el desvanecimiento, hacen que el acceso múltiple en una red inalámbrica sea más complejo que en una red cableada. Además, se hace necesario implementar en ellas mecanismos más robustos como por ejemplo, potentes Códigos de Redundancia Cíclica (CRC, por sus siglas en inglés) para la detección de errores y protocolos de la capa de enlace con transferencia de datos fiable que se encarguen de retransmitir las tramas corruptas.

Las redes basadas en el estándar 802.11 son las más extendidas tanto en el ámbito empresarial como particular [5]-[7], esto debido a su flexibilidad y movilidad que permiten a las personas utilizar sus dispositivos móviles o portátiles en cualquier lugar dentro del alcance de la red. Son capaces además de conectar y controlar dispositivos inteligentes (termostatos, cámaras de seguridad, electrodomésticos, sistemas de entretenimiento, etc) de manera conveniente y permiten compartir recursos en el hogar u oficina de forma más eficiente, como por ejemplo, varias personas pueden compartir una impresora inalámbrica. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), en España un total de 16,3 millones de hogares con al menos un miembro de 16 a 74 años (el 96,1 % del total) disponen de acceso a Internet por banda ancha fija y/o móvil. En 2021 el porcentaje fue del 95,9 %. En 2022 el 82,9 % de los hogares

con al menos un miembro de 16 a 74 años dispone de algún tipo de ordenador (de sobremesa, portátil, Tablet...). Por tipo de dispositivo, el 77,9% cuenta con ordenadores de sobremesa o portátiles y el 55,4% con alguna Tablet [8]. Por ende, resulta imperativo continuar con el desarrollo y la optimización de las redes inalámbricas, en particular aquellas que se alinean con el estándar 802.11 (WiFi), debido a su carácter imprescindible en el uso diario. Además, se está presenciando la aparición constante de dispositivos y aplicaciones que requieren capacidades de ancho de banda y velocidades de transmisión cada vez mayores.

Tabla 1.1: Comparación entre versiones de Estándares IEEE 802.11.

Estándar	Año	Frecuencia (GHz)	Velocidad (máxima teórica)	Características
802.11a	1999	5	54 Mbps	Mayor ancho de banda, menor interferencias con otros dispositivos.
802.11b	1999	2.4	11 Mbps	Amplia compatibilidad, bajo costo, mayor alcance que 802.11a.
802.11g	2003	2.4	54 Mbps	Compatibilidad con 802.11b, mayor alcance que 802.11a.
802.11n	2009	2.4/5	600 Mbps	Mejor rendimiento, mayor alcance, tecnología MIMO.
802.11ac	2013	5	6.9 Gbps	Mejor ancho de banda, tecnología MIMO mejorada, mayor eficiencia.
802.11ax	2019	2.4/5	10 Gbps	Mayor capacidad de usuarios y dispositivos, menor consumo de energía, mejor rendimiento en entornos congestionados.

Existen varios estándares 802.11 para la tecnología LAN inalámbrica en general, como se describen en la Tabla 1.1, estos poseen características comunes [1] como que emplean el mismo protocolo de acceso al medio: Acceso Múltiple por Detección de Portadoras con Prevención de Colisiones (CSMA/CA, por sus siglas en inglés), utilizan la misma estructura de trama para las tramas de la capa de enlace, poseen la capacidad de reducir su velocidad de transmisión para alcanzar mayores distancias y sus productos son compatibles en sentido descendente. Por otro lado tienen diferencias en la capa física en cuanto a sus frecuencias de operación, 2.4 GHz y 5 GHz. El rango de 2.4 GHz es una banda de frecuencias sin licencia, en la que además de los dispositivos 802.11 pueden encontrarse con los hornos microondas y teléfonos a 2,4 GHz. A 5 GHz, las redes LAN 802.11 proporcionan una distancia de transmisión más corta para un nivel de potencia determinado y son más afectadas por la propagación multicamino. Versiones del estándar más recientes (802.11n, 802.11ac y 802.11ax) emplean antenas de Múltiples entradas Múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en inglés) lo que les permite incrementar la capacidad y el rendimiento dado que estas pueden transmitir y recibir múltiples flujos de datos simultáneamente utilizando diferentes antenas, mejora la cobertura debido a la técnica de diversidad espacial, existe una mayor confiabilidad debido a las múltiples antenas y la transmisión de datos en paralelo, mejoran el rendimiento en entornos con interferencias y permiten aumentar la velocidad de transferencia de datos [9]-[12].

Las redes inalámbricas (específicamente el estándar 802.11) poseen varios modos de funcionamiento, como son el modo de infraestructura y modo ad-hoc. El modo de operación se refiere al método de comunicación que utilizan dos estaciones en una red. Se puede decir que la red está trabajando en modo infraestructura cuando los hosts (STA) de dicha red están asociados a una estación base o Punto de Acceso (AP), dado que todos los servicios de red son proporcionados por la red con la que un host se

conecta a la estación base. Los AP permiten aumentar la cobertura de la red ya que las STA no se conectan entre sí, sino que lo hacen a través del AP. Por otro lado, en las ad-hoc, los hosts inalámbricos tienen que ser capaces de proporcionar los servicios, ya que carecen de APs a los que conectarse, por lo que los datos deben transmitirse directamente entre emisor y receptor sin pasar por otro equipo, debido a estas características su rendimiento es menor a medida que el número de clientes aumenta. [1], [13]. En este trabajo los estudios se realizarán empleando siempre el modo infraestructura.

Debido a las limitantes antes enunciadas que poseen las redes inalámbricas, es preciso trabajar en su optimización en diferentes aspectos según los objetivos que se estén buscando, como pueden ser reducir las interferencias para aumentar el rendimiento o mejorar el consumo energético de los dispositivos. Diversas técnicas de optimización han mostrado obtener resultados positivos en este contexto, sin embargo, uno de los retos que presentan estas técnicas de optimización es reducir el tiempo para obtener una solución válida ante cambios en la red. Los algoritmos de optimización de redes inalámbricas más comunes, de forma general actúan sobre escenarios estáticos donde las condiciones de los mismos no varían, buscando la mejor configuración para cada caso.

En este trabajo fin de máster se estudia y desarrolla una solución que permita comparar escenarios de redes inalámbricas, principalmente basadas en redes 802.11, estableciendo si soluciones obtenidas previamente para un escenario tipo son aplicables a nuevos escenarios. Para ello se definen varias técnicas o mecanismos que primeramente posibiliten la abstracción de estos escenarios WiFi, generalmente como grafos los cuales son convertidos en matrices según las necesidades. Estas abstracciones aportan la ventaja de llegar a resultados mediante cálculos matemáticos o estadísticos los cuales presentan una gran facilidad de comprensión. Es preciso definir el concepto de grafo para trabajar correctamente con estos. Como resultado de la aplicación del conjunto de técnicas propuestas se obtiene una clasificación según similitud, entre el escenario de estudio y el conjunto de escenarios que han sido optimizados previamente. Para verificar la fiabilidad esta clasificación obtenida se recurre de nuevo al simular de redes “**ns-3**” para comprobar si las configuraciones precalculadas generan efectos similares en el escenario de pruebas. Con todo esto lo que se pretende obtener es que, a partir de un conjunto de escenarios generados de forma sintética y optimizados, se podría elegir de forma rápida qué configuración aplicar a un escenario que cambiará de forma dinámica.

1.1 Objetivos y campo de aplicación

Según lo expuesto anteriormente se puede definir como hipótesis de este trabajo la posibilidad de desarrollar y aplicar técnicas de abstracción de escenarios de redes inalámbricas basadas en redes 802.11 utilizando grafos, para comparar y evaluar la aplicabilidad de soluciones obtenidas previamente en escenarios similares. Además, al validar los resultados mediante simulaciones utilizando el software “**ns-3**”, se podrá determinar la eficacia de las técnicas desarrolladas. Con este enfoque se espera lograr una selección rápida y óptima de configuraciones en escenarios dinámicos mediante el uso de un conjunto de escenarios generados previamente. Partiendo de dicha hipótesis se logra establecer como objetivo principal estudiar y desarrollar una solución que permita comparar escenarios de redes inalámbricas, principalmente basadas en redes 802.11, estableciendo si soluciones obtenidas previamente para un escenario tipo son aplicables a nuevos escenarios. Para abordar este objetivo es necesario desglosar objetivos específicos, los cuales se comentan a continuación:

- Estudiar los escenarios de redes WiFi. Este objetivo permitirá analizar escenarios sencillos para buscar y clasificar las posibles comparativas según parámetros principales como por ejemplo: ca-

nales de trabajo, potencia de transmisión, área de cobertura, entre otros, sobre los que se puedan desarrollar luego las técnicas de comparación de escenarios.

- Definir e implementar técnicas de comparación de escenarios. Luego de trabajar en el primer objetivo se procede a definir las técnicas escogidas para implementarlas en scripts de python sobre escenarios de redes inalámbricas creados también en python utilizando los grafos como método de abstracción de los mismos.
- Validar las técnicas propuestas a través de la simulación de los escenarios WiFi. La validación de estas técnicas se hará por medio de la comparación de los resultados de las técnicas desarrolladas en el trabajo con los de las simulaciones en el software “**ns-3**”, donde se deberán obtener conclusiones parecidas por ambas vías, si la hipótesis resultara verdadera.
- Desarrollar una interfaz de usuario para acceder de forma sencilla a las técnicas implementadas. La interfaz de usuario desarrollada será mediante consola, donde el usuario insertará los grafos objeto de comparación y otros elementos en función del tipo de técnica escogida.

El desarrollo de cada uno de estos objetivos secundarios contribuirá a alcanzar el objetivo principal del trabajo y corroborar mediante los resultados obtenidos la veracidad o no de la hipótesis planteada.

1.2 Estructura del trabajo

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos este trabajo está estructurado con un primer capítulo de Introducción donde se expone brevemente lo que se ha hecho y los objetivos principales que se desean alcanzar. El segundo capítulo consta del Marco Teórico el cual presenta algunos de los trabajos que se refieren al tema de investigación y elementos esenciales para el análisis en la comparación de grafos. El tercero comenta las herramientas o técnicas empleadas para la resolución del problema y explica cómo se validan dichas técnicas para poder arribar a resultados para saber si el trabajo desarrollado es favorable o no; estos resultados serán mostrados en el capítulo cuarto. El quinto y último capítulo abordará las conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2

Estudio teórico

El punto de partida de todo logro es el deseo.

Napoleon Hill

En este capítulo se comentan aspectos referentes a la investigación precedente sobre el tema de tesis en cuestión; se analiza cómo abordan otros autores e investigadores la problemática de la influencia en el rendimiento de las Redes Inalámbricas los cambios bruscos que puedan ocurrir, para ello se clasifican los métodos empleados y sus limitaciones, como por ejemplo el empleo de iteraciones largas en el tiempo. Este análisis permite guiar el Trabajo Fin de Máster sobre cuestiones que mejoren aspectos de las investigaciones existentes, de esta manera se opta por adoptar mecanismos para saber si soluciones precalculadas para definir escenarios nuevos ayudarían a evitar esas iteraciones largas en el tiempo y a mejorar el rendimiento de la red.

El capítulo se estructura en 3 apartados, se realiza un bosquejo y clasificación de trabajos existentes, se estudia la teoría necesaria en cuanto a técnicas de comparación de grafos, además de un breve análisis de los diferentes sistemas de simulación que se pueden emplear para validar el trabajo propuesto.

2.1 Técnicas de optimización en el ámbito de las Redes Inalámbricas

Debido a los problemas planteados en el capítulo anterior que enfrentan las redes inalámbricas y las exigencias cada vez mayores en cuanto al rendimiento de las mismas, es preciso trabajar constantemente en su optimización. Nuestro trabajo pretende establecer mecanismos de comparación entre estructuras de redes con el objetivo de aplicar configuraciones óptimas predefinidas y ahorrar tiempos de simulación y capacidad de cómputo ante el advenimiento de una nueva estructura que se precise mejorar. Es necesario por ello analizar diferentes enfoques que detallan la optimización de las redes inalámbricas y sus inconvenientes, dentro de los cuales uno de los más importantes es el tiempo empleado en obtener soluciones. Como se emplearán grafos para representar los escenarios de Redes Inalámbricas en este trabajo, se requiere además, del estudio de artículos que expongan algunas de las diversas técnicas de comparación de grafos que existen.

Dentro de los diferentes enfoques estudiados que abordan el tema de la optimización de escenarios de Redes Inalámbricas y sus problemáticas, se realiza una clasificación con el objetivo de determinar los

métodos empleados. Atendiendo a los métodos encontrados en los trabajos leídos se puede realizar la siguiente clasificación:

Optimización del escenario mediante la asignación de canales.

Esta asignación de canales se puede dar de varias formas:

- según el número y distancias entre ellos, esta técnica es utilizada en [14]
- mediante el coloreado de grafos [15], [16]
- negociación no lineal multiagente [17].
- negociación automática y coloreado de grafos para la abstracción en el modelado del problema [18].

Optimización del escenario a partir de la cantidad de APs o estaciones base y sus posiciones

- Diversos son los trabajos que corresponden a esta clasificación como [19]-[26]. En el caso de [22] la optimización es referida a las celdas o células de una red móvil.

Optimización del escenario según la ubicación de los APs y la asignación de canales

- El empleo de la unión de estas dos técnicas se utiliza en los trabajos de [27], [28].

Asignación de canales según el número y distancias entre ellos

En el trabajo de [14] proponen el trabajo con los canales ortogonales. Estudian las bondades de la asignación de canales según el número y la distancia entre ellos, utilizando técnicas de optimización en escenarios reales. Sus enfoques de optimización se basan en la técnica de Recocido Simulado (SA, por sus siglas en inglés), así como enfoques heurísticos. Muestran que el optimizador no es capaz de conseguir mejores resultados cuando se utiliza todo el espectro en lugar de emplear sólo los canales ortogonales. El optimizador utiliza principalmente los canales ortogonales cuando están disponibles, observándose que la heurística considerada disminuye su rendimiento cuando hay más canales disponibles.

Realizan un estudio relacionado con el impacto del número de canales disponibles cuando no se considera la interferencia cocanal. Aunque la situación no es realista, se incluye para comparar sus resultados con las situaciones en las que sí se consideran. Los resultados muestran que, aumentando el número de canales no solapados mejora el rendimiento, ya que existen oportunidades de elegir un canal que evite las interferencias con los canales utilizados en otros puntos de acceso. Al introducir la interferencia cocanal, se estudia el efecto del número de canales disponibles. En esta comparación se determina que el mejor rendimiento lo obtiene el optimizador basado en el SA, seguido de la heurística de Búsqueda de canales menos congestionados (LCCS, por sus siglas en inglés) y, por último, la asignación aleatoria.

Este artículo consideran que sería necesario realizar la introducción de la dinamicidad en su modelo, para ver cómo reaccionan los diferentes enfoques a cambios durante y después de la convergencia.

Asignación de canales mediante el coloreado de grafos

Se estudia desde otro punto de vista la asignación de canales en redes de área local inalámbricas “Wireless Local Area Networks”(WLAN, por sus siglas en inglés) que funcionan en modo de infraestructura en [15], se modelan las redes como grafos multicapa, de forma que la asignación de canales se convierte en un problema de coloreado de grafos. La resolución de este problema incluye un comportamiento egoísta, ya que los nodos sólo están interesados en su rendimiento, no en el rendimiento global de toda la red. La

solución del problema consiste en asignar a cada AP de la red el canal de frecuencia que minimice las interferencias y, por ende, maximice el rendimiento de sus clientes. Como hay interferencias entre canales y el número de APs a asignar a un canal casi siempre es mayor que el número total de canales disponibles, esto se convierte en un problema de alta complejidad. Para un elevado número y variedad de escenarios, se resuelve el problema con dos técnicas diferentes de negociación automatizada: una negociación mediada por escalado de colina “Hill-Climbing” (HC, por sus siglas en inglés) y una negociación mediada por SA. También se resuelve el problema utilizando un optimizador de enjambre de partículas “Particle Swarm Optimization” (PSO, por sus siglas en inglés). Los resultados muestran que el SA se comporta como la mejor opción; es capaz de obtener mejores resultados que el PSO en los escenarios más complejos, con tiempos de ejecución un orden de magnitud inferiores. Se estudia cómo las diferentes propiedades del diseño de la red afectan a la ganancia de rendimiento que el SA es capaz de obtener con respecto al PSO. La ventaja de utilizar este enfoque de negociación (SA) se observa principalmente cuando los escenarios son más complejos. Exponen que la problemática relatada en su artículo se ubica dentro de otras más genéricas de investigación bien conocidas; como el Problema de Asignación de Frecuencias (FAP, por sus siglas en inglés) [29] y el problema de coloreado de grafos [30], [31], ya que las frecuencias pueden ser consideradas como colores.

En cuanto al problema de coloreado de grafos, este artículo cita el trabajo de [32] donde se hace un estudio del problema genérico de coloreado de vértices (VCP, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es asignar un color a cada vértice utilizando diferentes colores en vértices adyacentes y minimizar el número total de colores requeridos. Además, analizan a [32] donde también se incluye un estudio sobre otras generalizaciones del VCP, como el Bandwidth Coloring Problem (BCP), en el que se tiene en cuenta la distancia entre los colores prohibiendo aquellas coloraciones donde la distancia entre dos vértices conectados es inferior a un determinado valor. Enuncian otros trabajos que consideran las distancias entre colores como [33] y [34]. Estos trabajos que incluyen restricciones en el proceso de coloreado del grafo, se diferencian de la problemática de este artículo porque se centran en minimizar el mayor color asignado a los vértices, mientras en este existe un número predefinido de colores (la banda del espectro disponible en la que la tecnología es capaz de operar) y lo que se desea es minimizar las interferencias.

Enuncian que los principales trabajos de FAP se pueden encontrar en [29], donde se incluye un breve mapeo del problema de asignación de canales a las redes WLAN.

Como limitante se observa que este artículo considera para los escenarios un entorno estático donde los clientes no se mueven en el proceso de negociación, lo que restringe el rendimiento de los enfoques analizados, por lo que los tiempos de respuesta para que las soluciones sean de utilidad deben ser más cortos aún, ya que en situaciones reales estas redes están constantemente en movimiento. Pudiera brindársele una solución un tanto más realista a este trabajo, ya que su problema de coloración de grafos sería igualmente en escenarios estáticos pero se analizarían solo en los que tengan mayor probabilidad de formarse o en los que más similitud tengan con el primero, disminuyendo de manera efectiva este tiempo de respuesta al cual hacen alusión.

Parecido a [15] en [16] se aborda el problema de la coloración de grafos, específicamente el “Threshold Spectrum Coloring” (TSC) y el de “Chromatic Spectrum Coloring” (CSC). Se proporcionan resultados teóricos y reales, empujando para esto la red WiFi de la facultad Politécnica de la Universidad de Alcalá. Introducen dos problemas de coloración de vértices para grafos, en los que se da un espectro de colores dotado de una matriz de interferencias entre ellos. El problema TSC, motivado por la asignación de canales Wi-Fi, busca el menor umbral por debajo del cual la interferencia en cada vértice pueda mantenerse. El problema CSC es el complemento, en el que se da un umbral y el objetivo es encontrar el menor número de colores que permita respetar ese umbral. Se ilustran estos dos problemas con un caso práctico.

Para estos problemas, proporcionan resultados teóricos, mostrando que ambos son NP-hard y demostrando límites superiores para el menor umbral en TSC y el menor número de colores en CSC. Se presentan en primera instancia resultados experimentales para diferentes técnicas de coloreado probadas en grafos aleatorios utilizando el modelo Erdős-Rényi para $n \in 60, 70, 80$ vértices y con probabilidades $p \in 0, 1, 0, 3, 0, 5, 0, 7, 0, 9$ de conexión, con una matriz de interferencia de decaimiento exponencial. Para las técnicas de coloreado, proponen una heurística basada en el algoritmo de coloreado de grafos DSATUR, para cada uno de los problemas TSC y CSC, con el fin de tener en cuenta el espectro dado. Se comparan estas heurísticas con PSO, para problemas TSC de $k \in 4, 6, 11$ colores y problemas CSC de umbrales $t \in np/4, np/2, 3np/4$, donde np es el grado medio esperado del grafo.

Realizan una evaluación de la propuesta en un entorno realista como se comentó antes; haciendo uso de las posiciones reales de los 26 puntos de acceso (APs) desplegados en el edificio, y se consideran tres escenarios diferentes y representativos, con 200, 700 y 1300 usuarios de la red, respectivamente. Sus experimentos muestran que el rendimiento de las heurísticas TSC-DSATUR y CSC-DSATUR es mejor que PSO para los grafos más sencillos, disminuyendo esta mejora paulatinamente a medida que aumenta la complejidad de los grafos. Esto significa que los grados más altos implican más interdependencias entre coloración de los vértices, que es el tipo de restricción para la que están diseñados los optimizadores no lineales como el PSO empleado.

También se comprueba la diferencia entre los límites superiores teóricos y los mejores valores obtenidos en los experimentos, observando que cuanto más complejo es el grafo, menor es esta diferencia. Como posible trabajo futuro, pretenden desarrollar y probar modelos más realistas del problema, como el uso de gráficos 3D para modelar las interferencias entre las diferentes plantas del edificio.

Asignación de canales mediante la negociación no lineal multiagente

El enfoque basado en la negociación no lineal multiagente y demostrado en la asignación de canales WiFi, donde se obtienen resultados satisfactorios al compararlos con otras técnicas se observa en el artículo de [17]. Se compara el rendimiento de los enfoques propuestos con un optimizador de información completa basado en PSO, junto con la técnica heurística de facto LCCS. Se evalúan todas estas técnicas en una amplia gama de escenarios, incluyendo escenarios generados aleatoriamente y escenarios del mundo real. Los experimentos muestran que este enfoque supera al resto de técnicas en términos de bienestar computacional. Estudian además el efecto de algunas métricas para saber la ganancia que puede alcanzar este enfoque. El PSO es la única técnica cuyo rendimiento se aproxima al propuesto, pero su coste computacional es mucho mayor en comparación.

Las posibles aplicaciones de la negociación automatizada van desde el comercio electrónico [35] hasta la resolución de problemas de distribución de tareas, el intercambio de recursos o el diseño cooperativo [36]. Una de las ventajas más importantes de la negociación automatizada es que tiene en cuenta el conflicto de intereses desde el principio, lo que permite encontrar soluciones más estables. Aunque existe un trabajo importante sobre la negociación en redes complejas, se han realizado pocas incursiones muy específicas en problemas de este tipo [37].

El objetivo principal de este artículo se basa en explorar las posibilidades de utilizar técnicas de negociación no lineal [38] para resolver problemas de red complejos que involucran a partes interesadas, como el problema de la asignación de frecuencia en las redes de infraestructura Wi-Fi. En este escenario, diferentes proveedores de Wi-Fi, actuando como agentes, deben decidir colectivamente cómo distribuir los canales utilizados por sus puntos de acceso para minimizar la interferencia entre nodos y así maximizar la utilidad (rendimiento de la red) para sus clientes. Este problema pertenece a la familia de FAP y está fuertemente relacionado con el problema de coloración de grafos [39] y con problemas de modelos de optimización de restricciones distribuidas [40].

Expresan que la negociación automatizada es un campo bastante amplio [41] pero la mayoría de los autores están de acuerdo en que un problema de negociación puede caracterizarse por: un dominio de negociación (quién negocia y sobre qué negocia), un protocolo de interacción (cuyas reglas rigen el proceso de negociación) y un conjunto de mecanismos de decisión o estrategias que guían a los agentes negociadores a través de cada fase del protocolo de interacción [42].

Optimizar el uso de recursos en redes complejas con participantes egoístas es un desafío del mundo real y cada vez más crítico. Los experimentos muestran que los enfoques basados en la negociación superan a las referencias estudiadas tanto en bienestar social como en equidad. Se necesita un análisis de métricas más profundo, especialmente para determinar si las correlaciones observadas entre métricas son inherentes o están causadas por un sesgo de generación de escenarios.

Asignación de canales mediante la negociación automática y coloreado de grafos

En [18], parecido a [14] se trata el tema de la óptima selección de los canales de operación, pero esta vez utilizando como clientes a una red de sensores de vigilancia, donde igualmente se trabaja en bandas del espectro radioeléctrico no licenciadas, de ahí la necesidad de escoger correctamente las frecuencias de operación. En este trabajo proponen una aplicación con técnicas de negociación automática para la asignación de frecuencias, empleando además grafos coloreados como abstracción para el modelado del problema.

Debido al bajo costo de las cámaras basadas en IP CMOS, el sensor de vigilancia inalámbrico, las redes de vigilancia “Wireless Surveillance Sensors Networks” (WSSN, por sus siglas en inglés) [43] han surgido como una nueva aplicación de las redes de sensores, capaces de monitorear áreas públicas o privadas. Dado que estas redes son intensivas en ancho de banda y el espectro radioeléctrico es limitado, especialmente en bandas sin licencia, es obligatorio asignar canales de manera inteligente. En este trabajo los autores proponen la aplicación de técnicas de negociación automatizada para la asignación de frecuencias. Los resultados muestran que estas técnicas son muy adecuadas para el problema ya que al compararlas con otras se obtienen mejores resultados.

La asignación de frecuencias en WSSN basadas en Wi-Fi es un tema que aún no ha atraído la atención necesaria de la comunidad investigadora. Esta escasez de trabajos relacionados probablemente se deba a la complejidad del problema, que es NP-hard [44]-[48]. Los autores modelan el problema usando grafos, por lo que la asignación de canales es equivalente a colorear los enlaces de un grafo. Se incluye el efecto de tener canales parcialmente superpuestos (como es el caso en IEEE 802.11n) mediante el uso de una matriz de interferencia cocanal. En [44], los autores presentan un resumen de técnicas útiles para la asignación de frecuencias en Wi-Fi. En cuanto a otros trabajos de investigación relacionados con esta propuesta, se citan en [49]-[51], este último trabajo está inspirado en el problema de coloración de grafos y utiliza una medida para cuantificar el rendimiento de las soluciones, que es similar a la que se emplea en la negociación.

Desde un punto de vista práctico, la técnica que utilizan es LCCS [52]. En este documento, se muestra que aún hay margen de mejora, por lo que es posible llegar a soluciones que optimicen el uso del espectro de WSSN. Emplean un protocolo de negociación bilateral con un mediador, donde los agentes negociadores (dos proveedores de acceso) negocian con una estrategia basada en HC o SA. Se comparan los resultados con los obtenidos con la técnica de optimización denominada “Augmented Lagrangian Harmony Search Optimization” (ALHSO, por sus siglas en inglés), consiguiendo resultados bastante similares. Sin embargo, las técnicas de negociación son más simples y consumen menos tiempo que ALHSO. Como conclusión afirman que las técnicas de negociación son muy útiles para resolver el problema de asignación de frecuencias en WSSN.

Concluyen que el uso de técnicas de negociación como las descritas impone una sobrecarga computacional y de comunicación sobre los elementos de negociación; teniendo esto en cuenta en este enfoque, solo los AP (que en esta configuración no funcionan con batería) participan en la negociación. Además asumen que el costo del ancho de banda de los mensajes de negociación es insignificante en comparación con el alto volumen de datos intercambiados en las redes de videovigilancia.

Optimización del escenario a partir de la cantidad de APs o estaciones base y sus posiciones

En [19], se busca la optimización de redes inalámbricas a partir de simulaciones en 3D usando la técnica de teoría de rayos y algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés). La técnica de teoría de rayos permite evitar una gran cantidad de mediciones que deben hacerse cuando se utilizan y se calibran métodos empíricos, aumentando la precisión de la simulación ya que estos métodos son referidos a disposiciones espaciales concretas. La evaluación de la optimización la realizan en dos pasos donde el primero tiene el objeto de determinar si las soluciones que arroja el GA son óptimas y el segundo, evaluar la estabilidad del sistema de optimización, permitiendo analizar si la función objetivo fue definida correctamente. Para el proceso de optimización utilizan la herramienta de MATLAB basada en Algoritmos Genéticos: Toolbox de Optimización con Algoritmo Genético (GAOT, por sus siglas en inglés).

Para la optimización de la distribución de los APs en un escenario en concreto en [20] dividen el proceso en tres etapas. En general, el objetivo del algoritmo de optimización es encontrar el número mínimo de puntos de acceso y sus ubicaciones óptimas para cumplir lo más cerca posible los requisitos de entrada del usuario, el algoritmo es implementado luego en la aplicación de planificación de RF basada en web, que permite su uso simultáneo por varios usuarios. Exponen que dentro de los métodos de computación evolutiva más conocidos están las Estrategias Evolutivas (ES, por sus siglas en inglés) y los GA, en este artículo prueban y comparan ambos métodos para quedarse con el que arroje mejores resultados, se seleccionan las ES en función de su eficiencia computacional y su fiabilidad para encontrar el óptimo global en cuanto a su fitness. El modelado que emplean presenta problemas cuando aparecen paredes gruesas u otros obstáculos significativos, ya que el modelo no es capaz de considerar las reflexiones y difracciones de la onda electromagnética. El desarrollo continuo de la aplicación se centra en la mejora de los modelos de predicción de propagación y en el ajuste adicional de la función de fitness.

Se presenta un enfoque para optimizar la cobertura de radio en interiores utilizando múltiples puntos de acceso para entornos interiores en [21]. Se utilizan el algoritmo genético y el recocido simulado (SA, por sus siglas en inglés) para determinar las posiciones óptimas de los puntos de acceso y lograr una cobertura óptima. Introducen un método de optimización jerárquico y finalmente se realizan comparaciones entre los métodos propuestos. Los resultados demuestran que el algoritmo genético individual puede aplicarse a la optimización de la ubicación de los puntos de acceso y se garantiza una convergencia satisfactoria y el procedimiento de optimización de dos pasos garantiza una mejor convergencia para el algoritmo genético al limitar el área de ubicación para cada punto de acceso.

En el artículo [22] se emplea como estrategia de optimización el algoritmo genético en el segundo paso de un total de tres para un proceso de planificación automática de celdas en el diseño de redes de radio móviles. Desean determinar el número de celdas, sus sitios óptimos y los parámetros necesarios para cumplir con los requisitos del sistema minimizando los costos involucrados, tanto el costo espectral como el costo financiero. Primero utilizan un sistema experto difuso para ajustar los parámetros de cada celda. Luego el GA para encontrar los sitios óptimos de las celdas y desarrollan un algoritmo basado en la técnica de división de celdas para reubicarlas debido al crecimiento del tráfico en una red existente.

Utilizan un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA, por sus siglas en inglés) para resolver el problema de ubicación de puntos de acceso de una red WLAN en [24]. El objetivo es maximizar la cobertura de

señal sobre el área de interés. El problema se formula como un problema de optimización multiobjetivo, donde las variables de decisión se derivan de las ubicaciones de los AP en el área objetivo. Los objetivos consisten en el número de puntos de acceso y la relación señal a ruido promedio (SNR, por sus siglas en inglés) en todo el área. La principal ventaja de usar este algoritmo es que se pueden obtener múltiples configuraciones de ubicación óptima para diferentes números de AP a partir de un solo enfoque, lo que hace que existan más alternativas para el diseñador de la red. Los resultados de la simulación indican que el MOGA es capaz de generar un resultado de ubicación que es superior al producido mediante técnicas de ubicación estándar. Los resultados son validados mediante datos estadísticos y perfiles de datos analizados.

En [25] expresan que las redes de área local inalámbricas son cada vez más populares para proporcionar acceso a redes de alta velocidad. La mayoría de los sistemas desplegados actualmente operan en la banda de frecuencia no licenciada de 2.4 GHz. A menudo pueden existir brechas de cobertura o pérdida de capacidad debido a puntos de acceso mal ubicados, por lo que en este trabajo se analiza la obtención de una colocación de AP WLAN cercana a la óptima y evalúan su rendimiento en un entorno típico de centro urbano o campus. El rendimiento del sistema se evalúa utilizando una función objetivo que tiene como objetivo maximizar tanto el área de cobertura como la calidad de la señal general. Los algoritmos de optimización utilizados en este artículo evalúan esta función objetivo en un espacio de búsqueda discreto, lo que reduce la complejidad del problema, al mismo tiempo que proporcionan una aproximación razonable al problema de optimización continua. Los resultados numéricos muestran que los algoritmos de búsqueda aleatoria, como el SA, pueden proporcionar soluciones muy buenas. Sin embargo, la velocidad de convergencia del recocido simulado depende en gran medida de la ajuste de los parámetros de simulación y de una buena elección del conjunto inicial de posiciones de transmisor. Los algoritmos de eliminación sucesiva, como la poda, aunque suelen producir soluciones subóptimas, convergen en tiempo polinomial. Por lo tanto, en este artículo proponen una combinación de los dos enfoques: utilizar la poda para obtener un conjunto inicial de posiciones de transmisor y refinarlos utilizando ya sea búsqueda en vecindario o SA.

En [23] al igual que en [26] se considera el problema de elegir las ubicaciones óptimas para las estaciones base en un sistema de comunicaciones inalámbrico. En [26] consideran que los factores que afectan la selección óptima son las áreas de servicio no uniformes en entornos de propagación complejos, la cobertura mutua y la interferencia de múltiples estaciones base, y el objetivo de servicio que generalmente se define por el nivel de señal pero también puede definirse por la dispersión de retardo para ciertos sistemas digitales. El problema de optimización se aborda utilizando técnicas de SA, que ofrecen un método para lograr soluciones cercanas al óptimo para problemas complejos de optimización combinatoria, muestran que el SA es un enfoque viable para manejar problemas prácticos de ubicación de estaciones base en un entorno urbano de microcelda.

Optimización del escenario según la ubicación de los APs y la asignación de canales

El diseño de una red de área local inalámbrica presenta varios problemas fundamentales: determinar la ubicación óptima de los AP y la asignación de canales a los mismos, estos son abordados en [27]. Expresan que los servicios WLAN en entornos tanto al aire libre como en interiores deben diseñarse para lograr la máxima cobertura y rendimiento y para ello los AP deben instalarse de manera que la suma de la señal medida en cada punto de demanda de tráfico se maximice. Analizan que al estar los usuarios conectados a un AP y compartir el ancho de banda del canal inalámbrico con otros en el mismo AP, la ubicación del AP debe decidirse cuidadosamente para maximizar el rendimiento teniendo en cuenta el equilibrio de carga entre los AP y la interferencia de canal para la demanda de tráfico de los usuarios. Proponen un enfoque de optimización de la ubicación de AP y la asignación de canales en WLAN mediante la formulación de un problema óptimo de programación lineal entera (ILP, por sus siglas en inglés). El objetivo de

optimización es minimizar la utilización del canal, que representa la congestión en las áreas de servicio WLAN. Se observa a partir de los resultados de la simulación que el método propuesto encuentra la ubicación óptima de los AP y los canales que minimizan su utilización.

Luego de analizar varios trabajos existentes con diferentes enfoques en cuanto a la optimización de escenarios de Redes WiFi, se concluye que existen factores comunes como la gran cantidad de iteraciones, la complejidad de los algoritmos, el tiempo de convergencia y por ende la no, o escasa implementación de estos, en escenarios en tiempo real. Por lo que en este caso se entiende que si al adoptar mecanismos para saber si soluciones precalculadas para definir escenarios nuevos ayudarían a evitar lo previamente descrito y, por ende, a mejorar el rendimiento de la red, sería un aporte a las investigaciones discutidas y otras futuras. Como punto en común se observa que en estos trabajos se emplean los grafos como abstracción para la representación del problema y así poder emplear los métodos de optimización que proponen.

Debido a esto y a que en este trabajo también se utilizan los grafos con el mismo fin, es preciso analizar los mecanismos existentes de comparación entre grafos como base teórica para poder aplicar los objetivos propuestos como avances o soluciones a los trabajos previamente descritos, ya que este análisis permitirá implementar algoritmos propios los cuales nos aporten soluciones más didácticas y sencillas; por lo que en la siguiente subsección se enuncian algunas de las técnicas existentes analizando este aspecto.

2.2 Técnicas de comparación de grafos

A continuación se identifican varios trabajos de investigación que abordan algunas de las técnicas de comparación de grafos existentes:

- En [53] se habla de establecer una similaridad de grafos numérica basándose en dos conceptos fundamentales, el isomorfismo y el Máximo Común Subgrafo (MCS, por sus siglas en inglés). Se establece una función que calcula la métrica de similaridad entre grafos, basada en el cálculo del número de nodos del MCS y el máximo entre grafos comparados, lo cual dará un valor entre 0 y 1 que indica el grado de similitud. A menor valor indica una mayor similitud. Como la ecuación está complementada, si el valor se acerca a 1 son grafos casi idénticos, si se acerca a 0 son grafos diferentes.

Definen el isomorfismo como en [54], indicando que el isomorfismo de subgrafos puede ser usado para encontrar si un objeto es parte de otro, o si un objeto está presente en un grupo de objetos. Se menciona el concepto de MCS, el cual puede ser usado para medir la similaridad de objetos incluso si no existe isomorfismo de grafos o subgrafos entre los grafos correspondientes. Se busca encontrar el subgrafo máximo en común entre dos grafos, el mayor representa la similitud.

Refieren que en [55] se puede encontrar la siguiente representación teórica de isomorfismo de grafos: Sea $G_1=(V_1, E_1, \alpha_1, \beta_1)$ y $G_2=(V_2, E_2, \alpha_2, \beta_2)$ dos grafos. Un isomorfismo de grafos entre G_1 y G_2 es un mapeo biyectivo $f:V_1 \rightarrow V_2$ tal que:

$$\alpha_1(x) = \alpha_2(f(x)), \forall x \in V_1 \quad (2.1)$$

$$\beta_1((x, y)) = \beta_2(f(x), f(y)), \forall x, y \in E_1 \quad (2.2)$$

Si $V_1=V_2=\emptyset$, entonces f es llamada un grafo vacío isomorfo.

Definen además el **Máximo Común Subgrafo** como: Sea G_1 y G_2 dos grafos y $G'_1 \subseteq G_1$, $G'_2 \subseteq G_2$. Si existe un grafo isomórfico entre G'_1 y G'_2 , entonces ambos son llamados subgrafo común de G_1 y G_2 .

G_2 . Si no existe otro subgrafo en común de G_1 y G_2 que tenga más nodos que G'_1 y G'_2 , estos se consideran MCS de G_1 y G_2 .

Citan a [54] con la idea de que en usos del mundo real a veces no existe una coincidencia exacta por lo que se considera un grado de error de tolerancia, se emplea entonces la distancia de edición de grafo (GED, por sus siglas en inglés). Una operación de edición puede ser una eliminación, inserción o sustitución. Estas operaciones pueden ser aplicadas a nodos o enlaces. La GED entre G y G' es definida como la secuencia más corta de operaciones de edición que transforman G en G' , lo que indica la mayor similitud entre los grafos. También indican que algunas operaciones de edición pueden tener más importancia que otras; por lo que las operaciones de edición tienen un coste asociado individualmente. Cuanto más probable es que ocurra una operación de edición, menor es su coste, una asignación de costes a las operaciones de edición individuales se denomina función de coste. Dado un conjunto de operaciones de edición junto con sus costes, el cálculo de la distancia de edición de grafos en su forma más general significa encontrar una secuencia de operaciones de edición que transformen, con un coste mínimo, uno de los grafos dados en otro, en este caso no consideran un coste asociado para calcular la distancia.

Tanto los conceptos de isomorfismo, de subgrafos isomórficos y del MCS son todas instancias de un cómputo de la distancia de edición de grafos, considerando funciones de coste por operación. A continuación se enuncia el cálculo de la métrica de similitud entre grafos, usando el concepto de MCS definido previamente.

$$\delta(G, G') = 1 - \frac{|mcs(G, G')|}{\max(|G|, |G'|)} \quad (2.3)$$

Añaden que el algoritmo de Máximo Común Subgrafo es un problema NP por lo que su ejecución se complejiza conforme crece el número de nodos de los grafos a comparar.

- En [54] se habla de que en muchas aplicaciones, por ejemplo, en el reconocimiento de patrones y la visión por computadora, se requiere medir la similitud de los objetos. Cuando los grafos se utilizan para la representación de objetos estructurados, el problema de medir la similitud de los objetos se convierte en el problema de calcular la similitud de los grafos, por analogía. En este artículo, se revisan las medidas de similitud en grafos y algoritmos relacionados.

Un concepto importante que analizan en la coincidencia de grafos es el Máximo Común Subgrafo, concepto que definen de igual manera a los artículos comentados anteriormente.

Los objetos del mundo real generalmente se ven afectados por el ruido, por lo tanto, es necesario integrar algún grado de tolerancia al error en el proceso de comparación de grafos. Una poderosa alternativa al cálculo de máximos comunes subgrafos es la coincidencia de grafos tolerante a errores mediante la GED. Las operaciones de edición se pueden aplicar tanto a los nodos como a los enlaces. La distancia de edición de dos grafos G y G' se define como la secuencia más corta de las operaciones de edición que transforman G en G' , cuanto más corta es esta secuencia más similares son los dos grafos. Por lo tanto, la distancia de edición es adecuada para medir la similitud de los grafos. La secuencia de operaciones de edición que transforman G en G' implica un mapeo de corrección de errores de los nodos de G a los nodos de G' .

Añaden que el Máximo Común Subgrafo de dos grafos y su distancia de edición están relacionados entre sí. Por lo tanto, cualquier algoritmo para el cálculo del Máximo Común Subgrafo puede usarse para el cálculo de la GED y viceversa, siempre que la función de coste satisfaga las condiciones establecidas indicadas en [56].

Analizan a [57], donde se presentó un estudio en profundidad de la influencia de la función de coste que se obtiene del cálculo de la distancia de edición de grafos. El resultado principal de este estudio es que para cualquier función de coste, existen infinitas otras funciones de coste equivalentes que conducen a la misma secuencia óptima de operaciones de edición para transformar dos grafos dados entre sí.

Añaden que el algoritmo estándar para la detección de isomorfismos de grafos y subgrafos es el de Ullman [58]. Es decir, para cada grafo de modelo se crea un conjunto de copias distorsionadas y se compilan en el árbol de decisión. El número de copias distorsionadas depende del error máximo admisible.

Además citan a [59] como a [60] ya que en ambos artículos describen un nuevo método para comparar un grafo G contra una base de datos de grafos modelo G_1, \dots, G_n para encontrar el modelo G_i con la menor distancia de edición $d(G, G_i)$ a G . El supuesto básico es que los modelos en la base de datos no son completamente discímiles. Por el contrario, se supone que hay grafos $S'_j S$ que aparecen simultáneamente como subgrafos en varios de los $G'_i S$, o múltiples veces en el mismo G_i . Se empareja G secuencialmente con cada uno de los $G'_i S$. Sin embargo, debido a los subgrafos comunes S'_j compartidos por varios modelos G_i , los $S'_j S$ se emparejarán con g múltiples veces, por lo que ocurre redundancia.

El árbol de decisión se usa para clasificar el grafo de entrada desconocido de la misma manera que en el caso de detección de isomorfismo de subgrafo exacto. La complejidad temporal de este procedimiento en tiempo de ejecución es solo cuadrática en el número de nodos del grafo de entrada. Sin embargo, el tamaño del árbol de decisión es exponencial en el número de vértices de los grafos del modelo y en el grado de distorsión a considerar. Por lo tanto, este enfoque se limita a grafos muy pequeños.

Analizan otros trabajos donde se aborda el tema de la detección de Máximo Común Subgrafo, como son: [61]-[63]. Además de ubicar artículos donde enuncian los métodos clásicos para la coincidencia de grafos tolerantes a errores, estos son: [54], [64]-[67]. La mayoría de estos algoritmos se basan en algún tipo de árbol de búsqueda que incorpora varias técnicas heurísticas de anticipación para podar el espacio de búsqueda.

Concluyen que los algoritmos de coincidencia de grafos revisados son muy generales. Los nodos y los enlaces de un grafo pueden representar cualquier cosa y no hay restricciones en las etiquetas de los nodos y los enlaces. El modelo de distorsión utilizado en el cálculo de la distancia de edición de grafos incluye la eliminación, inserción y sustitución de nodos y enlaces. Por lo tanto, es lo suficientemente potente como para modelar cualquier tipo de error que pueda introducirse en un grafo.

Expresan que adaptar un algoritmo de coincidencia de grafos a una tarea en particular requiere la solución de dos problemas concretos. Primero, se debe encontrar una representación gráfica adecuada de los objetos del problema principal. En segundo lugar, debe definirse la corrección de errores adecuada, es decir, las operaciones de edición junto con sus costes. Para la solución de ambos problemas, se debe utilizar el conocimiento específico del dominio siempre que sea significativo.

Se habla además de los campos donde es necesario aplicar la similitud entre grafos, ejemplo de ello son: el análisis de estructuras químicas, aprendizaje automático “machine learning”, monitorización de redes, transformación de grafos, entre otras.

- En [68] se proponen técnicas de obtención de similaridad entre grafos las cuales se clasifican en tres categorías: *editar la distancia o el isomorfismo de grafos*, *la extracción de características* y *los métodos iterativos*.

“Isomorfismo.” Dos grafos son similares si son isomórficos, o si tienen subgrafos isomórficos. La distancia de edición de grafos es una generalización del problema de *isomorfismo de grafos*, donde el objetivo es transformar un grafo en otro realizando una serie de operaciones (adiciones, eliminaciones, sustituciones de nodos o aristas y reversiones de aristas). Este método asocia a cada operación un coste y trata de encontrar la secuencia de operaciones que minimice el coste de hacer coincidir los dos grafos.

“Feature extraction.” (Extracción de características), la idea clave de estos métodos es que los grafos similares probablemente comparten ciertas propiedades, como la distribución de grados, el diámetro o los autovalores. Tras extraer estas características, se aplica una medida de similitud para evaluar la similitud entre las estadísticas agregadas y entre los grafos. Estos métodos son potentes y escalables; sin embargo, dependiendo de las estadísticas que se elijan, es posible obtener resultados que no son intuitivos.

“Métodos iterativos.” Expresa que *“dos nodos son similares si sus vecinos también lo son”*. En cada iteración, los nodos intercambian puntuaciones de similitud y este proceso termina cuando se alcanza la convergencia. Este método es empleado exitosamente en [69]-[71].

En este artículo relatan un grupo de innovaciones en cuanto a la Semejanza de grafos y a la Coincidencia de Subgrafos. En cuanto a la primera se desarrolla un método que involucra la propagación de creencias (BP, por sus siglas en inglés), brindando resultados positivos, expresan que excepto por la escalabilidad, no observan ninguna deficiencia en el método. En cuanto a la Coincidencia de Subgrafos desarrollan un enfoque basado en principios para seleccionar los componentes de tiempo importantes de los que se deben extraer los subgrafos. Es rápido y escalable (para redes biológicas además); excepto para redes de más de 10 000 nodos. Se generan desafíos principalmente en cuanto a la escalabilidad con el tamaño del grafo.

Comentan además que dentro de la coincidencia de Subgrafos existe la Coincidencia aproximada de Subgrafos para el que se desarrolló una herramienta llamada Alineación Aproximada de Grafos Basada en Índices de Subestructura (SAGA, por sus siglas en inglés) [72]. Esta técnica permite brechas de nodos, desajustes de nodos y diferencias estructurales de grafos y no requiere que se diseñe ninguna restricción por adelantado. Un índice sobre pequeñas subestructuras de los grafos se almacena en una base de datos. El grafo de consulta se divide en pequeños fragmentos y luego se prueba la base de datos utilizando un algoritmo coincidente para producir aciertos para subestructuras en la consulta. Las desventajas son que uno tiene que mantener una base de datos de estructuras pequeñas y que está basada en consultas.

También se explica el método de Minería de Subgrafos Densos Coherentes (CODENSE, por sus siglas en inglés) [73], el cual se considera el más adecuado para el objetivo del presente artículo. Se profundiza además en los métodos de Análisis tensorial [74] y *“Graphscope”* [75], entre otros.

- En [55] se habla sobre el algoritmo GED. Se examina el avance de la investigación del algoritmo para proporcionar una revisión de la literatura existente y ofrecer ideas. Dado que los grafos pueden ser atribuidos o no y la definición de costes para las operaciones de edición es variada, los algoritmos GED existentes se clasifican y se describen en detalle en este estudio.

La distancia de edición de grafos es una forma importante de medir la similitud entre grafos por pares con tolerancia a errores en coincidencias de grafos inexactas y se ha aplicado ampliamente al análisis y reconocimiento de patrones. Sin embargo, hasta ahora apenas hay una encuesta sobre los algoritmos GED y, por lo tanto, este artículo se puede considerar novedoso.

En este estudio se analizan las ventajas y desventajas de los algoritmos basados en GED y se comparan experimental y teóricamente. La definición de funciones de coste es un tema clave de los

algoritmos GED, el mapa autoorganizado (SOM, por sus siglas en inglés) se puede emplear para aprender funciones de coste automáticamente [76]. GED se define como el coste de las secuencias de edición menos costosas; por lo tanto, la estrategia de búsqueda de la ruta más corta está estrechamente relacionada con los algoritmos GED. Por lo tanto expresan que el algoritmo de Dijkstra es el algoritmo de camino más corto más popular [77], [78]. Además, el algoritmo de Maximización de Expectativa (EM, por sus siglas en inglés) se aplica a la optimización de parámetros [79].

Expresan limitantes existentes en el cálculo de GED como por ejemplo: que aún no se resuelve bien la comparación de la similitud de los nodos y enlaces correspondientes en dos grafos. Para grafos con atributos, los atributos de los nodos y los enlaces se pueden usar para comparar la similitud, pero qué atributos deben adoptarse y estar disponibles para calcular la distancia sigue siendo un problema abierto. Para grafos que no tienen atributos, la conectividad del grafo se puede usar para comparar la similitud. Sigue sin resolverse cómo caracterizar la conectividad para lograr una mejor evaluación de la similitud. En este artículo aconsejan que se debe estudiar una estrategia de búsqueda adecuada para la secuencia de costes mínimos de edición para mejorar tanto la eficiencia como la precisión de los algoritmos GED.

- En [80] se presenta un esquema de clasificación novedoso al distinguir entre métodos para grafos deterministas y aleatorios. Este esquema es útil para una mejor comprensión de los métodos, sus desafíos y, finalmente, para aplicar los métodos de manera eficiente en un entorno interdisciplinario de ciencia de datos para resolver un problema particular que involucre análisis de red comparativo.

2.3 Sistemas de simulación para las validaciones”

Para las validaciones de las diferentes técnicas de comparación generadas se utilizará un sistema de simulación. Existen varios simuladores ampliamente utilizados que se muestran atractivos para lograr lo que se desea en este trabajo, entre ellos se destacan “**ns-3**”, “**OMNeT++**” y “**MATLAB**”.

- **ns-3**: es un simulador de redes de código abierto ampliamente utilizado. Es una plataforma de simulación de redes de propósito general que permite a los investigadores estudiar, analizar y evaluar el rendimiento de las redes de comunicación. Proporciona un entorno de simulación realista y preciso para diseñar y desarrollar protocolos de red, algoritmos y aplicaciones. Se implementa en C++ y ofrece una amplia gama de modelos de dispositivos de red, protocolos de enrutamiento, esquemas de acceso al medio, modelos de tráfico y modelos de canal. También incluye herramientas y utilidades para analizar y visualizar los resultados de las simulaciones. Es muy utilizado en el ámbito académico para realizar investigaciones, pruebas de concepto y probar nuevas tecnologías de red. Es un proyecto en constante desarrollo y cuenta con una comunidad activa de usuarios y desarrolladores que contribuyen a su mejora y expansión continua [11].

Ventajas: Proporciona un conjunto completo de modelos de capa física y MAC específicos para redes WiFi, como los estándares IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g y 802.11n. Estos modelos están diseñados para ofrecer un alto nivel de precisión y realismo en la simulación de redes WiFi, lo que permite un modelado detallado de las características de la red, como el rendimiento, la interferencia y la capacidad. Los usuarios tienen la capacidad de ajustar diferentes parámetros y configuraciones de la red WiFi según sus necesidades específicas. Está diseñado para admitir simulaciones a gran escala por lo que puede manejar una gran cantidad de nodos y dispositivos en un escenario de red WiFi, lo que permite simular redes de tamaño real o incluso más grandes. Incluye modelos de propagación de la señal, protocolos de acceso al medio y modelos de tráfico específicos para redes WiFi [81].

Desventajas: Requiere un conocimiento avanzado de programación y conceptos de redes para su utilización, por lo que la curva de aprendizaje puede ser empinada para los usuarios no familiarizados con estos temas, además de precisar un tiempo considerable de desarrollo [81].

- **OMNeT++:** Es un entorno de simulación de eventos discretos utilizado para modelar, simular y analizar el rendimiento de sistemas de comunicación, redes de computadoras, sistemas distribuidos y otros sistemas de tiempo real [82]. OMNeT++ es una abreviatura de "Objective Modular Network Testbed in C++" (Banco de pruebas de redes modulares objetivas en C++). Proporciona un marco flexible y extensible para la creación de modelos de sistemas complejos utilizando el lenguaje de programación C++. Permite crear modelos detallados y realistas de sistemas de comunicación y redes, y luego simular su comportamiento en un entorno controlado. Sus modelos están compuestos por módulos que interactúan entre sí mediante el intercambio de mensajes. Los eventos se modelan como ocurrencias puntuales en el tiempo, en lugar de seguir una noción continua del tiempo, lo que permite la simulación de sistemas en los que los eventos ocurren de forma discreta, como el envío y recepción de mensajes en una red. Se utiliza para evaluar el rendimiento de protocolos de comunicación, algoritmos de enrutamiento, aplicaciones distribuidas y otros aspectos de los sistemas de comunicación [13], [83], [84].

Ventajas: Simulador de código abierto ampliamente utilizado en el campo de las redes de comunicación. Entorno de simulación modular y extensible, facilitando la creación de modelos personalizados y la integración de diferentes componentes. Amplia gama de modelos y bibliotecas para simular redes inalámbricas, incluyendo redes WiFi. Visualización interactiva de los resultados de la simulación y la generación de informes detallados [85].

Desventajas: Requiere un conocimiento sólido de programación y conceptos de redes para su utilización. La configuración de los escenarios y definición de modelos personalizados precisan un tiempo y esfuerzo considerables. La documentación y el soporte pueden no ser tan extensos como en otros simuladores [85].

- **MATLAB:** MATLAB es un entorno de programación y simulación ampliamente utilizado en ingeniería y ciencias aplicadas. Las simulaciones de escenarios de redes WiFi en MATLAB pueden ser utilizadas para analizar y evaluar el rendimiento de redes inalámbricas en diferentes configuraciones y condiciones. Proporciona herramientas para generar modelos tridimensionales de escenarios y posicionar los elementos de la red de manera precisa. Ofrece diferentes modelos de propagación, como el modelo de pérdida de trayectoria (path loss), el modelo de atenuación logarítmica (log-distance), entre otros. Permite definir estos parámetros y configurar los algoritmos de acceso al medio, como CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Ofrece una variedad de funciones y herramientas para facilitar la simulación de redes WiFi, como el paquete de simulación inalámbrica y la biblioteca de comunicaciones inalámbricas Wireless Communications Toolbox. [86]-[88]

Ventajas: Entorno de programación y simulación ampliamente utilizado que proporciona una interfaz amigable para usuarios no expertos en programación. Incluye herramientas específicas para el procesamiento de señales, comunicaciones y simulación de redes inalámbricas. Permite la visualización y análisis eficiente de los resultados de la simulación [89].

Desventajas: Limitado en términos de escalabilidad y rendimiento en comparación con simuladores dedicados como NS-3 y OMNeT++. Algunos módulos o funcionalidades específicas pueden no estar disponibles en las versiones básicas y requerir la adquisición de complementos o toolboxes adicionales. Es un software comercial y puede tener un costo asociado [90].

Capítulo 3

Sistema de clasificación automática de escenarios de redes inalámbricas para su optimización

Hacer es la mejor manera de decir.

José Martí

En este capítulo se incluye la descripción del desarrollo del trabajo. Se explican las bases para el modelado de las redes inalámbricas, específicamente las redes WiFi debido a que son el objeto de estudio de este trabajo. Las redes inalámbricas, como se ha explicado en los capítulos previos presentan variadas dificultades que deben enfrentar y además debido a esto es necesario definir una combinación de parámetros en su configuración (potencia de transmisión, canales de operación, ancho de banda, antenas, etc.), que maximicen su rendimiento.

Referido a estas bases se explica el modelo matemático escogido para la abstracción de dichas redes, el grafo. Es necesario establecer una definición de su concepto a fin de utilizarlo de manera adecuada para la resolución del presente trabajo.

Se puede definir un grafo de nombre G [91] como un triple ordenado $(V(G), E(G), \text{función de incidencia de } G)$ formado por un conjunto no vacío $V(G)$ de vértices, un conjunto $E(G)$, disjunto de $V(G)$, de aristas .^{edges.en} inglés, y una función de incidencia que asocia a cada arista de G un par no ordenado de vértices (no necesariamente distintos) de G . Si e es una arista y u y v son vértices tales que $(e) = uv$, entonces se dice que e une a u y v ; los vértices u y v se llaman los extremos de e .

Un grafo es un modelo para representar relaciones entre elementos de un conjunto. Gráficamente se representa como un conjunto vértices o nodos unidos por líneas que representan las aristas o enlaces.

Escoger la combinación de parámetros que optimicen el rendimiento de una red WiFi puede realizarse por dos vías, medir directamente en campo y tomar decisiones; la otra es mediante simulaciones que sean capaces de recrear un entorno real. La primera es engorrosa y conlleva mucho tiempo de trabajo, la segunda se realiza más a menudo y posee muy buenos resultados, pero también conlleva tiempos extensos de simulación y por ende un alto coste computacional.

Para visualizar lo explicado se simulan en “**ns-3**” los grafos que se observan en la Tabla 3.1, poseen 26 APs en las mismas posiciones y se generan 103 simulaciones donde se altera el parámetro de los canales de

operación de los APs. Las 103 simulaciones vienen dadas porque se varían los canales con los que trabajan los APs de la siguiente manera; se realizan tres simulaciones donde todos los APs utilizan el mismo canal, una con el 1, otra con el 6 y otra con el 11. Se realizan otras 50 simulaciones con aleatoriedad de canales, esta vez empleando los ortogonales (1, 6 y 11), y finalmente otras 50 empleando todos los canales del 1 al 11 también aleatoriamente. Como resultado se detallan los tiempos de ejecución para este total de simulaciones; donde se observa el crecimiento del tiempo de ejecución de las mismas cuando aumenta el número de clientes.

Tabla 3.1: Tiempos de ejecución de simulación de plantillas de escenarios.

APs	26	26	26	26	26	26	26	26
STAs	147	196	245	294	343	392	441	490
T. ejecución (seg)	2065.144	2939.634	4073.787	5332.325	6842.339	8505.163	10358.881	12285.773

A continuación se observan los datos recogidos en la Tabla 3.1 correspondiente a la figura 3.1 donde queda demostrado el aumento lineal de los tiempos de simulación de estos escenarios tan solo aumentando la cantidad de clientes en cada uno. Para referencias con la realización de otras simulaciones iguales pero en diferente sistema es preciso destacar que estas, al igual que todas las demás en el presente trabajo se realizaron en el servidor del Departamento de Automática con las características siguientes, Sistema Operativo Ubuntu 22.04, Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz, 32 GB DDR4-2400, SSD.

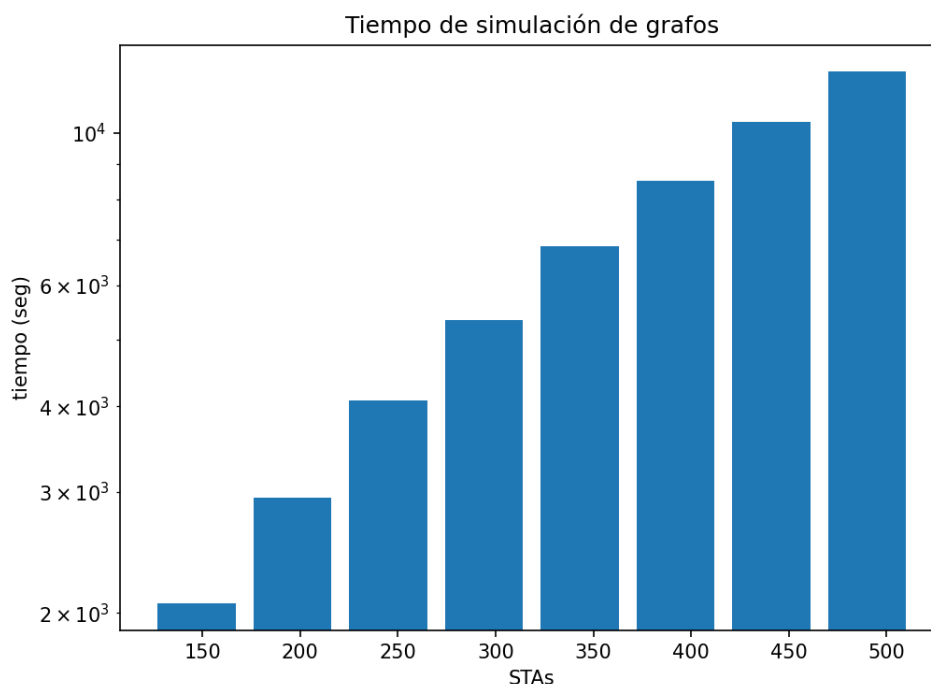


Figura 3.1: Tiempos de simulación para escenarios WiFi en "ns-3".

Debido a que estos tiempos aumentan a medida que lo hacen los escenarios WiFi y su complejidad, surge la necesidad de compararlos mediante técnicas más simples y que arriben a resultados igualmente concluyentes. Debido a esto en el presente trabajo se realiza una explicación de las técnicas escogidas que cumplan lo anteriormente planteado, luego se aplican estas a los escenarios WiFi mediante el empleo de grafos generados, dichas técnicas tienen el objetivo de comparar diferentes escenarios para su clasificación

y ser capaces de elegir entre un conjunto de configuraciones y escenarios precalculados, cuál sería el que mejor se adapte a un nuevo posible escenario objeto de estudio y optimización.

Para el correcto desenvolvimiento de este capítulo se decidió estructurarlo en los siguientes apartados principales: modelado del escenario de redes inalámbricas, definición del problema y estudio de un sistema de clasificación automática de escenarios de redes inalámbricas para su optimización.

3.1 Modelado del escenario de redes inalámbricas

Una red inalámbrica se emplea para interconectar nodos mediante ondas electromagnéticas, o sea, estos nodos transmiten y reciben a frecuencias específicas previamente estandarizadas por lo que no es preciso el uso de cableado para que exista una conexión o transmisión de datos. Poseen la gran ventaja de que son más baratas que una red alámbrica y como desventaja que, precisamente por transmitir la información por el aire (medio de transmisión) presentan una mayor vulnerabilidad ante varios factores como se ha explicado en capítulos anteriores y además a los ataques, por ende, la seguridad es un tema importante a tener en cuenta en la implementación de estas redes. Están compuestas por dispositivos que emiten señales a frecuencias y potencias específicas, esto depende del tipo de red inalámbrica que se esté desplegando. En función de esto, los enlaces pueden ser punto a punto o punto a multipunto, y presentar características como distancias mayores o menores de conexión, además de tener o no acceso a Internet. La conexión entre estos dispositivos ocurre principalmente cuando existe un valor de señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés) y por tanto una potencia de transmisión aceptables desde el dispositivo transmisor hacia el receptor, lo cual permitirá establecer un enlace de calidad adecuada.

3.1.1 Descripción de redes inalámbricas basadas en WiFi

Una red inalámbrica basada en WiFi (que opere en modo infraestructura) posee dos tipos de elementos principales, estos son los Puntos de Acceso y las estaciones (usuarios). El AP es un router al cual se conectan los usuarios para brindarles acceso a Internet. El estándar IEEE 802.11 es el que se encarga de definir un conjunto especificaciones de control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés) y de la capa física (PHY) para la implementación de redes inalámbricas de área local en las bandas de frecuencias 2,4 GHz, 5 GHz, y 60 GHz [92]. El rendimiento de estas redes depende de la intensidad de la señal de radio que se transmite, como se comentó previamente. Esta intensidad se emplea para medir el nivel de potencia de las señales que se reciben por otro dispositivo dentro de la red en cuestión, y puede variar en función de elementos o factores como el ruido, la cantidad de usuarios conectados al mismo AP, las velocidades de transmisión, etc.

Se puede entender por APs y clientes, como dos tipos de nodos que difieren debido a características específicas de cada uno de esos elementos interconectados en una red, los cuales presentarán enlaces de conexión o de interferencia, que en dependencia de lo que se estime en la red dependerán de los factores descritos en la subsección anterior (SNR, Potencia, canales de operación, etc.). Por lo tanto, se puede abstraer una red inalámbrica de infraestructura basada en WiFi como un grafo de nodos de diferentes propiedades que corresponderán a los APs y a los STAs y enlaces entre estos nodos atendiendo a parámetros como Potencia de transmisión, SNR, distancia entre los dispositivos, entre otros.

Para el estudio y análisis de las redes WiFi se emplean los grafos como método de abstracción matemático de los escenarios y su comparación se realiza mediante mecanismos o técnicas desarrolladas en este trabajo. Los nodos del grafo se clasifican como Puntos de Acceso “AP” o estaciones “STA”, según las características o atributos que estos presenten. Los enlaces o aristas se emplean para definir dos tipos

de enlaces: los enlaces de señal y los enlaces interferentes. En el caso de estudio los que sean desde el AP a cada cliente al que este le da servicio será el de señal y los restantes serán los interferentes los cuales podrán encontrarse entre STA y STA, entre STA y AP y viceversa, o entre AP y AP, todos en un solo sentido. Nuestro estudio se enfoca principalmente en el trabajo con los enlaces de señal.

Es posible establecer una relación entre los nodos y los enlaces totales (señal + interferentes) mediante la combinación sin repeticiones del total de nodos tomados de dos en dos (transmisor y receptor), lo planteado queda expresado en la siguiente ecuación:

$$Total_de_enlaces = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (3.1)$$

Siendo n la cantidad de nodos totales (APs + STA) y r la cantidad de elementos tomados en cada combinación.

3.2 Definición del problema

El estudio del problema en cuestión se realiza sobre parámetros que responden a grafos que simulan redes WiFi a 2.4 GHz, por lo que se habla siempre de los 11 canales empleados en España relativos a este rango de frecuencias, pero análogamente lo abordado se pudiera estar refiriendo a una red WiFi a 5 GHz, con diferencia en la cantidad de canales. Lo que se desea es implementar métodos que permitan la clasificación de escenarios WiFi para establecer semejanzas con un conjunto de escenarios optimizados y precalculados, de los cuales se puedan extraer sus configuraciones y aplicarlas a un escenario nuevo, con esto se logra ahorrar el tiempo necesario de simulación y optimización del mismo.

3.2.1 Estructura para el modelado del problema

Tomando un grafo simple como el mostrado en la figura 3.2, con solo 3 APs y estableciendo dos variables de análisis como la Potencia de Transmisión y los canales de operación, si se quisiera calcular la cantidad de escenarios a generar realizando sus combinaciones para su posterior simulación y análisis, este resultado tendería al infinito, dado que la cantidad de valores de potencia son parámetros casi infinitos en un rango determinado. Ahora bien, analizando lo que sucede en la realidad, se fija el valor de Potencia con que se transmite, y se deja el parámetro de canales como variable, en este caso aún quedarían 3 APs elevados a la 11 (correspondiente a la cantidad de canales), esto daría como resultado 177.147 configuraciones posibles. Por consiguiente, se tardaría mucho en analizar y comparar los parámetros de esta cantidad de escenarios, sabiendo además, que este no es un escenario real, dado que siempre existen mayor cantidad de APs y por ende, clientes y más combinaciones posibles con los canales de operación. Para una mejor visualización, en la figura 3.2 solo se presentan los enlaces de señal y no las interferencias.

Debido a esto, tomando el mismo grafo simple del que se habla en el ejemplo anterior se pueden establecer similitudes a simple vista si a ese mismo grafo se le fijan las posiciones de los APs y se varían la cantidad de clientes, como se observa en las figuras 3.3a, 3.3b y 3.3c. Para que esta semejanza sea cuantificable al simular estos grafos con los APs trabajando todos en un mismo canal, o con canales ortogonales, es posible medir parámetros como el throughput y comparar si en realidad esa semejanza que se observa al inicio es real o no.

Lo explicado previamente se puede visualizar en la figura 3.4, por simplicidad solo se presentan los enlaces de señal, como se ha comentado previamente, al igual que diferenciando los tipos de nodos como APs y STAs también se pueden diferenciar los enlaces como de señal o interferentes. Dado que un grafo es

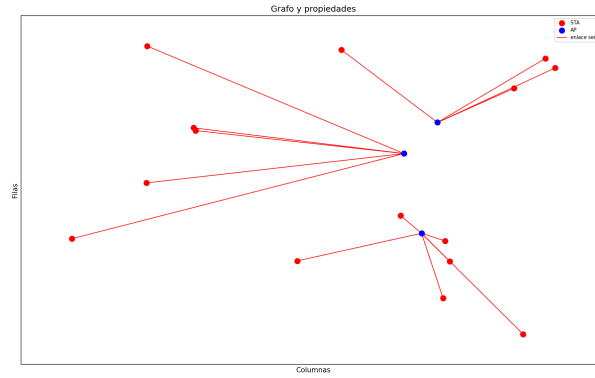


Figura 3.2: Estructura de red WiFi simplificada mediante grafos.

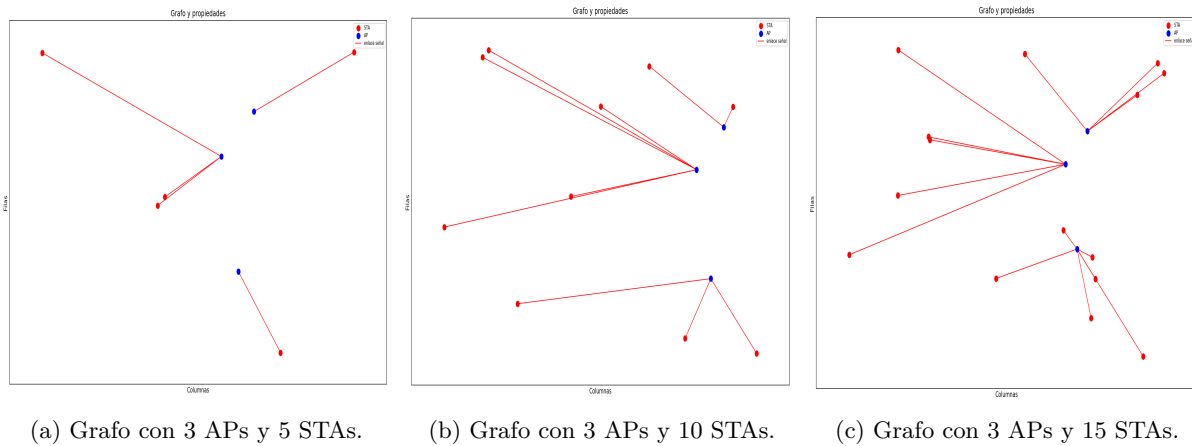


Figura 3.3: Representación sencilla de un grafo.

una entidad que puede representar una red inalámbrica, específicamente el protocolo WiFi y sus atributos, se utiliza para el análisis y solución del problema en consideración, lo cual nos facilita la asignación de características relevantes a los nodos y enlaces correspondientes.

Según lo comentado previamente para el estudio en profundidad de estos grafos cada tipo de nodo y de enlace cuenta con un grupo de propiedades las cuales se pueden adaptar según lo deseado, un ejemplo de ellas son las que se observan a continuación:

Propiedades de los nodos en un escenario

```
[ (0, {'pos': (187.4028, 444.4622, 1.5), 'type': 'AP', 'floor': 0, 'listSTA': [112]}),
  (1, {'pos': (312.4374, 338.3772, 1.5), 'type': 'AP', 'floor': 0, 'listSTA': [31,
  97, 156]}),
  (2, {'pos': (254.1661, 346.4257, 1.5), 'type': 'AP', 'floor': 0, 'listSTA': [30,
  32, 33, 44, 100, 108]}),
  (3, {'pos': (393.4414, 293.0284, 1.5), 'type': 'AP', 'floor': 0, 'listSTA': [49]}),
  (4, {'pos': (564.4610, 20.4131, 1.5), 'type': 'AP', 'floor': 0, 'listSTA': [118]}),
  (5, {'pos': (413.4930, 261.1854, 1.5), 'type': 'AP', 'floor': 0, 'listSTA': [64,
  74, 143]}) ]
```

Se observa que existen diversas propiedades que se les pueden asignar a los nodos de los grafos, todo esto se realiza mediante la utilización de networkx, que es la biblioteca de python por excelencia para estos fines. Específicamente en este ejemplo de un grafo representando una red WiFi se ejemplifican: su identificador (ID, puede ser un número o nombre), posición en un plano (x, y, z), tipo de nodo, ya sea

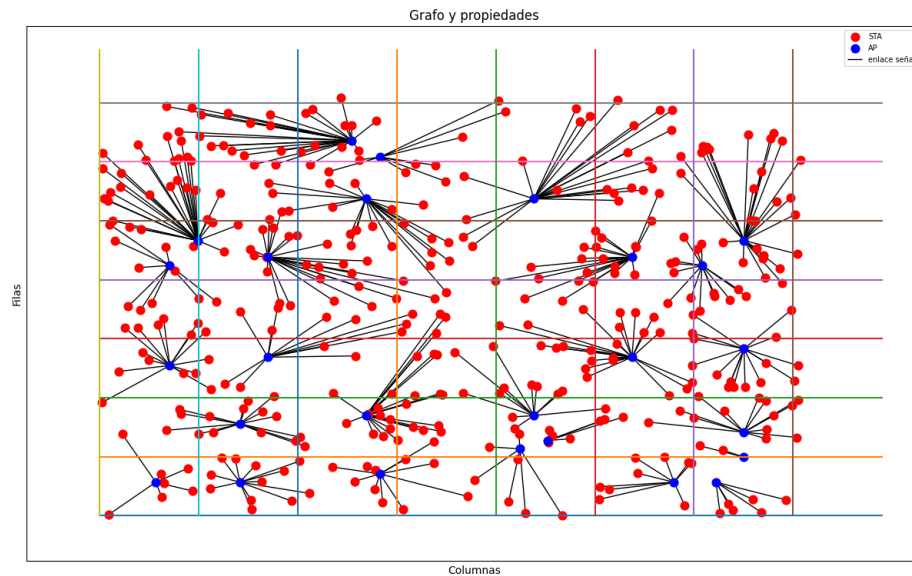


Figura 3.4: Estructura de red WiFi mediante grafos.

AP o STA y otras características según el tipo que sean; en este caso si son clientes tienen asociado el AP que les brinda cobertura y si son APs tienen cargados todos los clientes a los cuales les da servicio.

Al igual que en los nodos, con los enlaces también se pueden especificar características como se observa a continuación; en este caso se emplean: los identificadores de los nodos origen y destino, la distancia entre estos dos nodos, o sea la distancia del enlace en cuestión y si este es un enlace de señal o interferencia.

Propiedades de los enlaces en un escenario

```
(1, 27, {'dist': 365.24945670888434, 'type': 'interference'}),
(1, 28, {'dist': 204.9475398895293, 'type': 'interference'}),
(1, 29, {'dist': 429.54546074469675, 'type': 'interference'}),
(1, 30, {'dist': 65.56582267067596, 'type': 'interference'}),
(1, 31, {'dist': 11.086604022588489, 'type': 'signal'}),
```

Entre los simuladores estudiados en la Sección 2.3, luego de analizar sus ventajas y desventajas, debido al análisis exhaustivo en cuanto al nivel de precisión y realismo en la simulación, se decide utilizar “**ns-3**” para el modelado y estudio de las Redes WiFi en cuestión. Se generan grafos como plantillas para simularlos con el software escogido y extraer resultados concluyentes.

La simulación en “**ns-3**”, se realiza mediante un script en python que llama a la configuración de la red WiFi que se encuentra en otro script en el lenguaje por defecto del software que es “C++”. En el script que ejecuta las simulaciones y recopila datos para un conjunto de pruebas específico. Se generan combinaciones aleatorias de canales, posiciones y potencias. En el caso de estudio se ejecutan simulaciones se definen los canales a emplear por los APs que se variarán según los requerimientos y que se explica más adelante, la Potencia de Transmisión la cual puede variar se decide dejar en un valor fijo por el análisis previo que se realizó, en función de esto se definen el parámetro de la cantidad de simulaciones a realizar por cada grafo leído, que para el desarrollo de este caso serían 103.

En el fichero de configuración de “**ns-3**”, se utiliza la biblioteca de simulación “NS-3”, la función “main” realiza la simulación propiamente dicha utilizando esta biblioteca. Existen varias funciones y métodos que se utilizan en la simulación, como funciones para convertir direcciones de red en cadenas, enviar paquetes, recibir trazas, recopilar datos, configurar la movilidad de los dispositivos, etc. Es necesario crear la topología de la red por lo que se declaran y configuran los distintos nodos de red a emplear, en este caso serán los APs y los STAs, se incorporan aspectos de movilidad, donde los APs estarán estáticos y los STAs si poseerán movilidad para que exista variedad en los grafos y además para lograr simular los casos de la vida real donde los clientes al ser inalámbricos tienen la posibilidad de moverse aleatoriamente. Se deben especificar los protocolos y aplicaciones a utilizar para lograr activar la generación de paquetes de tráfico, esto se debe hacer para los niveles de las capas de enlace, red y transporte. Este fichero se programó para simular grafos conectados completamente, por lo que si alguno de los grafos generados como plantilla poseyera al menos un AP sin clientes la simulación no ocurre, esto pasa con más frecuencia cuando el número de APs es parecido al número de clientes y no sea necesario el uso de todos los APs para dar una completa cobertura. Es un aspecto a tener en cuenta dentro del trabajo, entre otras razones por esto es que se trabaja con un número mucho mayor de clientes que de APs en los escenarios propuestos.

3.3 Sistema de clasificación automática de escenarios de redes inalámbricas para su optimización.

Debido a las limitantes en cuanto a dinamicidad y los elevados tiempos de simulación de las técnicas de optimización de investigaciones previas analizadas en el capítulo del Marco Teórico y de los mostrados en epígrafes anteriores cuando se simulan grafos en el software “**ns-3**”; y pretendiendo ser capaces de obtener una respuesta rápida a una posible variación de la red, se deciden emplear técnicas que permitan comparar escenarios de redes WiFi, lo que posibilitará aplicar un conjunto de configuraciones precalculadas a un nuevo escenario. En este caso ante una similitud aceptable solo se precisaría aplicar al escenario nuevo una configuración ya concebida, esto ahorra el tiempo de simulación y optimización, solo empleando sencillas comparaciones entre este y la base de datos que se tenga. Las técnicas que se emplean son las enunciadas a continuación;

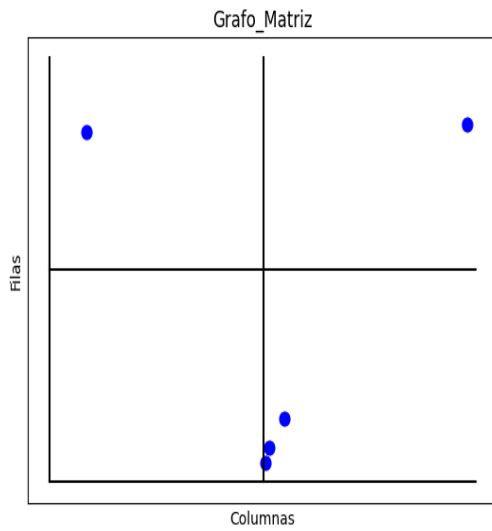
- Discretización del escenario.
- Por radio de cobertura de los APs.

3.3.1 Discretización del escenario

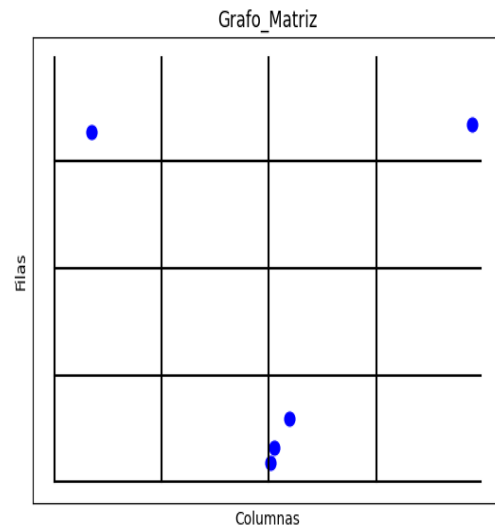
Mediante esta técnica se desea comparar un grupo de grafos analizando el comportamiento de sus nodos. Se puede definir la discretización a convertir un grafo en sentido general a una matriz que contabilice una cierta cantidad de nodos por unidad de área. Esta área puede corresponder a las dimensiones del escenario en sí o a la cantidad de celdas generadas por cada eje de coordenadas, todo esto depende de el enfoque que se le dé a la solución. Por lo tanto se tienen un grupo de grafos con nodos que presentan propiedades las cuales los hacen diferir en su definición respondiendo estos a que pueden ser APs o STAs. En este caso como se desea establecer una semejanza mediante la discretización de dichos escenarios (contar los nodos por unidad de área), no se tienen en cuenta los enlaces o edges que son la otra característica fundamental de estos grafos. Como se establece que se contarán la cantidad de clientes o APs pertenecientes a un área en concreto, es correcto deducir que en dependencia de la resolución que se le dé a este grafo convertido a matriz, cambiarán estos valores y se asemejarán más o menos unas matrices a las otras, por lo que

escoger la resolución correcta también es de vital importancia, este elemento se tiene en cuenta para el desarrollo del problema para el análisis de las soluciones obtenidas en el trabajo confeccionado.

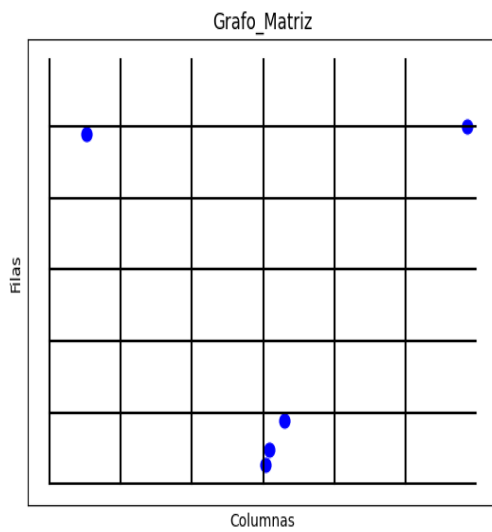
Se puede definir entonces la “**resolución**” de la matriz a la cantidad de filas x columnas en las que la dividimos para contabilizar los nodos existentes por unidad de área. Es posible realizar una división con resolución que no sea cuadrada, siempre y cuando sea adecuado al problema que se presente. A continuación se muestran tres grafos de 5 (figuras 3.5a, 3.5b, 3.5c, 3.5d), 10 (figuras 3.6a, 3.6b, 3.6c, 3.6d) y 15 (figuras 3.7a, 3.7b, 3.7c, 3.7d) clientes con tres resoluciones diferentes, lo que hace posible concluir que la cantidad de nodos (en este caso STAs) por unidad de área puede variar de una resolución a otra y por ende, los resultados de similitud ante una posible comparación. En el caso de las figuras que se observan no existe mucha diferencia dado que se ejemplifica un grafo con pocos clientes para mejor visualización, pero en situaciones de la vida real los STA se presentan en mayor cantidad.



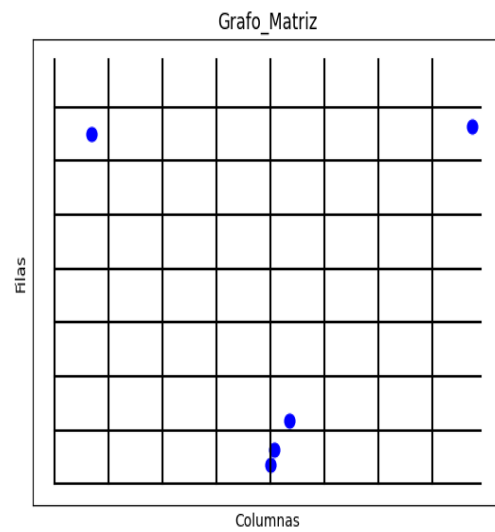
(a) Matriz de 2x2 con 5 STAs.



(b) Matriz de 4x4 con 5 STAs.

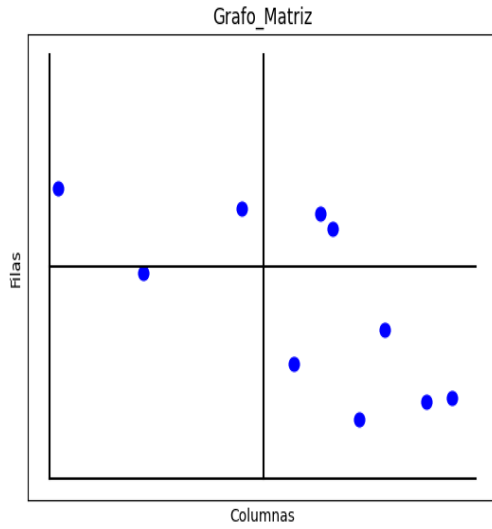


(c) Matriz de 3x3 con 5 STAs.

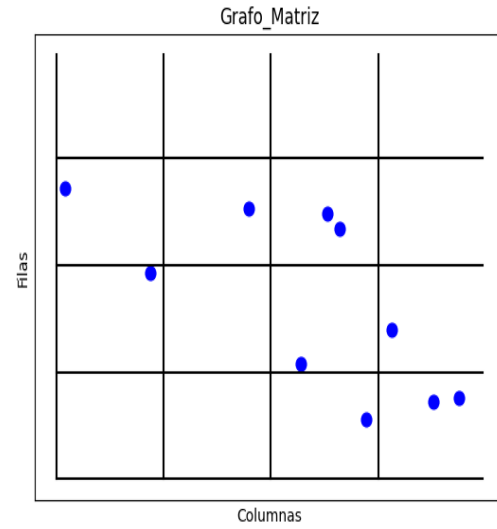


(d) Matriz de 8x8 con 5 STAs.

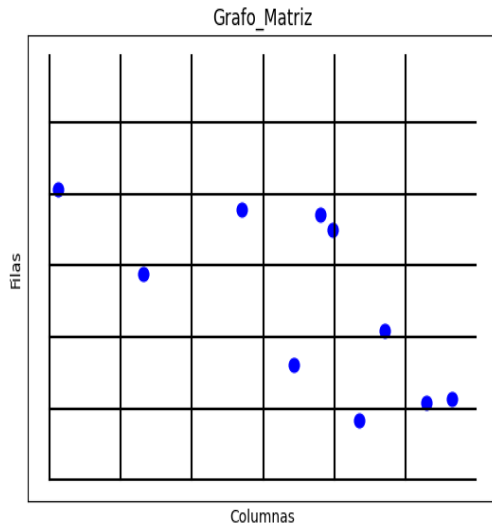
Figura 3.5: Diferencia de resoluciones en grafo con 5 clientes.



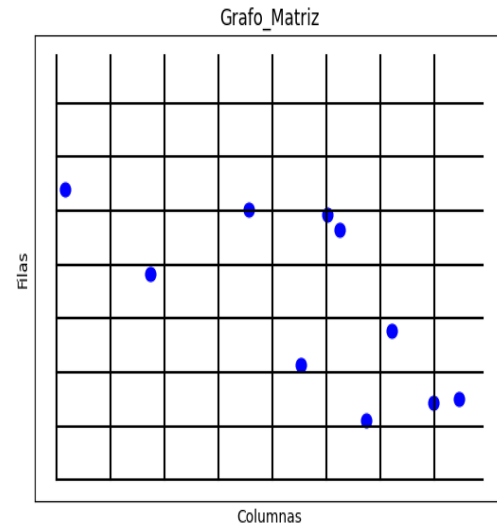
(a) Matriz de 2x2 con 10 STAs.



(b) Matriz de 4x4 con 10 STAs.



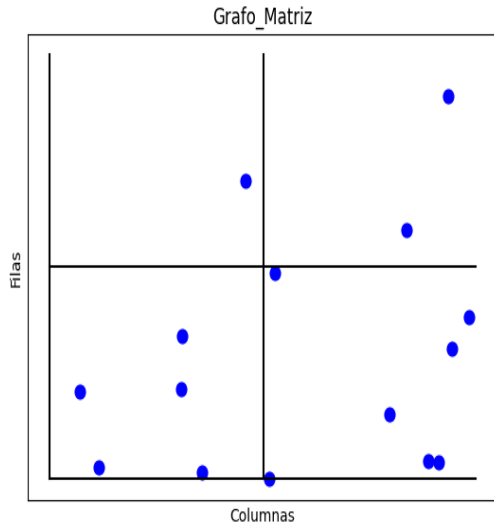
(c) Matriz de 6x6 con 10 STAs.



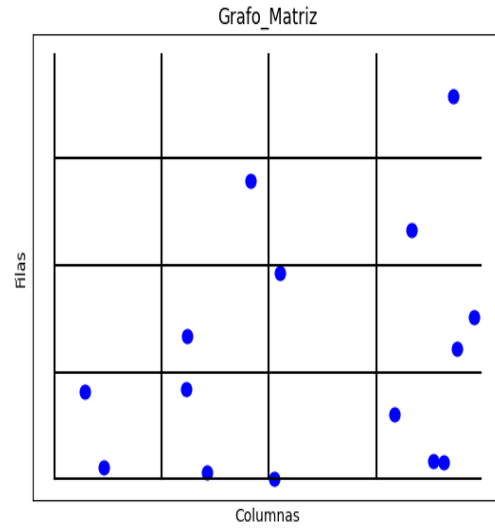
(d) Matriz de 8x8 con 10 STAs.

Figura 3.6: Diferencia de resoluciones en grafo con 10 clientes.

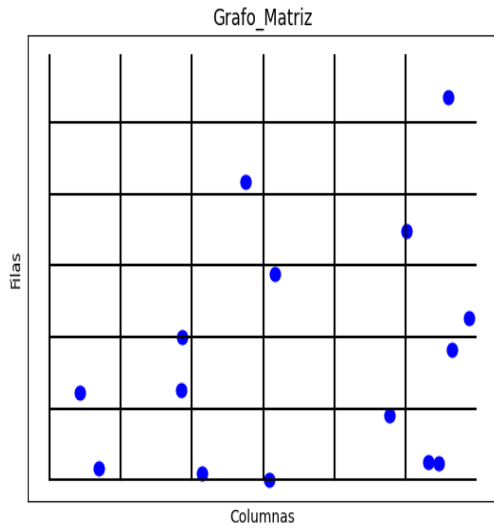
Para el desarrollo de este método, fue necesario evaluar el grafo, analizar los clientes y los APs, aunque los grafos creados de la base de datos poseen la misma cantidad de APs y en las mismas posiciones, para un futuro grafo de entrada con variaciones en ambos tipos de nodos si pudiese ser preciso el uso de los dos análisis. Con estos datos se abstraigo el grafo a una matriz mediante herramientas de python, luego la matriz es dividida según resoluciones preestablecidas. Esto se realiza tanto para el grafo a evaluar como para el conjunto con el que se comparará. Tomando como referencia los ejemplos de las subfiguras 3.5a, 3.5b, 3.5c, 3.5d, se pueden obtener las siguientes matrices con resoluciones de 2x2, 4x4, 6x6 y 8x8.



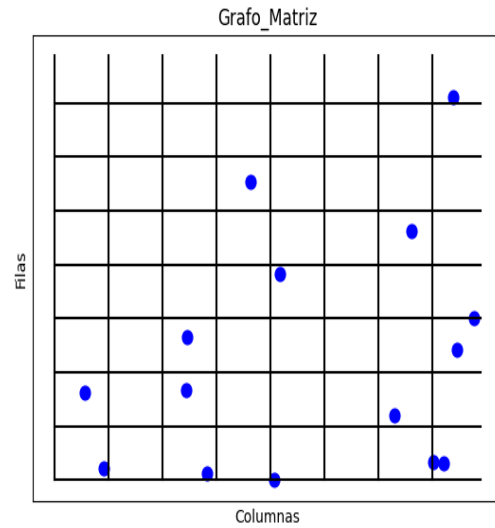
(a) Matriz de 2x2 con 15 STAs.



(b) Matriz de 4x4 con 15 STAs.



(c) Matriz de 6x6 con 15 STAs.



(d) Matriz de 8x8 con 15 STAs.

Figura 3.7: Diferencia de resoluciones en grafo con 15 clientes.

$$M_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

$$M_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

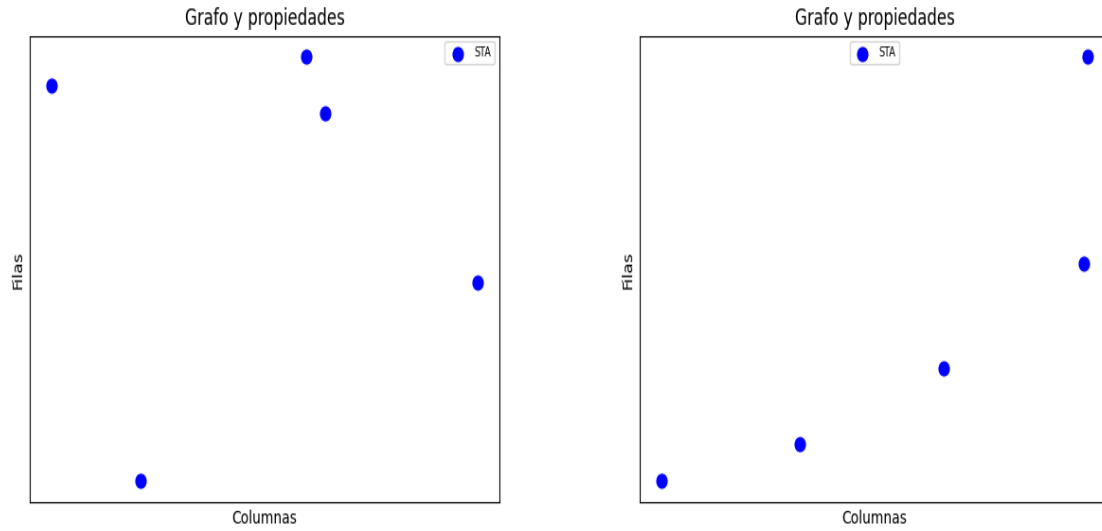
Para analizar la similitud entre cada pareja de grafo se restan las matrices obtenidas tanto para el grafo a evaluar como para los de set con que se compara obteniendo una llamada “matriz diferencia” reflejada en la ecuación 3.2, por lo que existe una matriz diferencia para cada una de las resoluciones empleadas por cada pareja de grafos que se compare.

$$Matriz_diferencia_{F \times C} = abs(Matriz_entrada_{F \times C} - Matriz_set_{F \times C}) \quad (3.2)$$

Luego por pasos a seguir se realizan las siguientes transformaciones a partir de la “matriz diferencia”, con el objetivo de establecer la mayor similitud del grafo de entrada con el conjunto de la base de datos que se comparó. Primero se realiza el sumatorio de los valores absolutos de cada uno de los nodos de la matriz diferencia como se observa en la ecuación 3.3.

$$Sumatoria_Matriz_Diferencia = \sum_{res=1}^{F \times C} (Matriz_diferencia_{F \times C}) \quad (3.3)$$

Si tenemos dos grafos de 5 clientes como se observa en las figuras 3.8a y 3.8b. Hallando la diferencia entre estas dos de ejemplo, atendiendo a las ecuaciones 3.2 y 3.3, para las resoluciones 2x2, 4x4, 6x6 y 8x8, queda lo siguiente.



(a) Grafo de 5 clientes a comparar.

(b) Grafo de 5 clientes a comparar.

Figura 3.8: Parejas de grafos con 5 clientes a comparar.

$$MD_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 2$$

$$MD_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 10$$

$$MD_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 10$$

$$MD_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 10$$

Como siguiente paso a la “matriz diferencia” se le aplica una normalización a ceros y unos 3.4 donde si la resta entre cada píxel es menor igual que 3 se pone a cero y si es mayor a 1, luego se hace el sumatorio de esta matriz. Se hace de esta manera porque la cantidad de clientes es muy elevada y debe existir diferenciación en el momento de discretizar para poder establecer celdas a cero. En el ejemplo que se muestra al ser los nodos pequeñas cantidades esto no es necesario aplicarlo, solo se llevan a cero las celdas donde no existan clientes, se muestran los resultados a continuación. Se calcula el sumatorio de

esta matriz diferencia normalizada, como se observa en la ecuación 3.5. Se observa cómo quedan estos resultados aplicados al ejemplo.

$$Matriz_diferencia_normalizada_{F \times C} = \|Matriz_diferencia_{F \times C}\| \quad (3.4)$$

$$Sumatorio_Matriz_diferencia_normalizada = \sum_{res=1}^{F \times C} (Matriz_diferencia_normalizada_{F \times C}) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} MDN_{2 \times 2} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 2 \\ MDN_{4 \times 4} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 7 \\ MDN_{6 \times 6} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 9 \\ MDN_{8 \times 8} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 10 \end{aligned}$$

También se estiman como parámetros a tener en cuenta para los resultados el cálculo de la moda del resultado de la “matriz diferencia” y la media de la misma cuya ecuación se visualiza en 3.6.

$$Media_Matriz_Diferencia = \frac{\sum_{res=1}^{F \times C} (Matriz_diferencia_{F \times C})}{F \times C} \quad (3.6)$$

Además, se calcula la desviación típica 3.7, 3.8, esta es una medida de dispersión o variabilidad de un conjunto de datos con respecto a su media. Indica cuánto se alejan los valores individuales del conjunto de datos de su valor promedio. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza. Para calcularla, primero se obtiene la diferencia entre cada valor y la media del conjunto de datos, luego se eleva al cuadrado cada diferencia, se suman todas las diferencias al cuadrado y se dividen por el número total de valores. Por último, se toma la raíz cuadrada de este resultado para obtener la desviación típica. Esta explicación se puede observar en las siguientes ecuaciones, de manera desglosada y resumida.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.8)$$

Cuanto mayor sea la desviación típica, mayor será la dispersión o variabilidad de los datos alrededor de su media. Por el contrario, una desviación típica baja indica que los datos están más agrupados y cercanos a su media. En este trabajo se calcula este parámetro para comparar la dispersión entre diferentes conjuntos de datos o para evaluar la precisión de los modelos desarrollados con respecto a las simulaciones con el software “**ns-3**”.

En base a los menores valores obtenidos para las métricas establecidas (la moda, la media, sumatoria valor absoluto, sumatoria valor normalizado y desviación típica) y en función de las resoluciones se obtiene una similitud mayor en una pareja de grafos sobre las demás que nos sirve para afirmar que la configuración óptima del escenario base escogido puede ser aplicada al escenario nuevo de entrada.

Estos resultados permiten escoger una resolución y una de las métricas establecidas para el método estudiado al escenario de entrada y a todos los escenarios con que se desee comparar este y obtener resultados de similitud.

Es necesario validar los resultados obtenidos; por lo que se simulan en el software “**ns-3**” la pareja de grafos escogidos y se mide su similitud mediante parámetros escogidos como el Throughput, Delay y Jitter. Las validaciones se explican con más detalle en el Capítulo 4.

Para llegar a un resultado final en la semejanza de los grafos se realiza una fase de calibración. Dicha fase se realiza con los resultados de los dos métodos desarrollados, aplicando una ecuación que los sume y le asigne pesos según importancia a estos. Esta ecuación y la explicación de sus elementos se detalla al finalizar este epígrafe y la cual provee unificación en los resultados en el caso de que estos difieran de un método al otro.

3.3.2 Clasificación por radio de cobertura de los APs.

Esta otra versión de comparación se analiza desde el punto de vista de las cualidades o propiedades de los nodos que corresponden a los APs, estos poseen en dependencia de algún parámetro establecido a priori, como puede ser la SNR, potencia de transmisión o distancia, a quién de todos los clientes del escenario le pudieran brindar cobertura. Lo que se desea estudiar en este caso es, dado que hay una variedad de grafos a comparar con la misma cantidad de APs dispuestos en los mismos puntos, en dependencia de distancias preestablecidas para analizarlas por igual, a cuántos clientes fuera posible servir desde cada AP en base a esos radios de cobertura predefinidos en el programa.

En esta técnica se trabaja en establecer la semejanza, pero desde otro punto de vista. Dado que tenemos a los APs en posiciones fijas y los clientes asociados a estos son los que van cambiando de posición en cada grafo (posiciones aleatorias), se analizan una serie de distancias de cobertura de la posición de los APs y se calculan la cantidad de clientes para cada una de esas distancias en cada AP, son comparados todos los grafos que posean la misma cantidad de clientes. Para ganar en uniformidad se estudian los mismos grafos que se emplean para la técnica anteriormente desarrollada. A continuación se evidencian los radios de cobertura de cada AP que se tuvieron en cuenta para las comparaciones.

- hasta 5 metros
- entre 5 y 10 metros

- entre 10 y 15 metros
- entre 15 y 20 metros
- entre 20 y 25 metros
- entre 25 y 30 metros

Estas distancias se calculan mediante la ecuación de “cálculo de distancia entre dos puntos”, los cuales se encuentran en un eje de coordenadas cartesianas (x; y). Sean dos puntos “1” y “2” a los cuales se desea saber la distancia entre ellos la ecuación a aplicar es la siguiente:

$$distancia_{1,2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.9)$$

Una vez calculadas las distancias se contabilizan la cantidad de clientes que puede poseer cada AP en cada una de estas clasificaciones. Luego se realizan matrices donde en las filas están cada uno de los APs y las distancias establecidas en las columnas por lo que al intersecar fila 1 y columna 1 tendremos la cantidad de clientes que posee el AP 1 para el radio de cobertura menor que 5 metros. Estas matrices permiten comparar cada una de las versiones entre ellas de los diferentes grafos que se precise. En este punto se realiza al igual que en el caso anterior la búsqueda de la “matriz diferencia” y se calculan de igual manera (para las mismas métricas, las mismas ecuaciones) todos los parámetros para medir la similitud y llegar a resultados.

3.3.3 Fase de calibración

Se desea implementar una fase final de calibración que permita llegar a un resultado más preciso dado que se consideran en las soluciones ambos métodos, de no coincidir estas en una misma solución. En este caso se define una ecuación 3.10 que tiene en sus términos las variables a insertar por cada método, siendo estos los índices referentes a la pareja de grafos escogida que mayor similitud tengan. Además presentan un parámetro que multiplica a cada una de estas variables el cual les aporta un peso. Para los pesos se estiman dos variables, α y β a las cuales se les varían sus valores para analizar qué método tiene más relevancia o veracidad a la hora de determinar la similitud entre grafos, como se observa en la Tabla 3.2. Esto se determina mediante una comparación con los resultados de similitud de escenarios de las validaciones con el software “ns-3”.

$$I = \alpha * Discretiz_Escenario + \beta * Radio_APs \quad (3.10)$$

Donde I indica la igualdad entre dos grafos, “Discretiz_Escenario” el resultado correspondiente al método primero y “Radio_APs” el resultado del segundo método. Esto pudiera cambiar el resultado final dado que los dos métodos no tienen por qué coincidir (en la similitud entre dos grafos) y al variar los pesos se estaría dando mayor importancia a uno sobre otro y lograr una unificación de resultados en la respuesta al problema objeto de estudio.

Tabla 3.2: Valores de α y β .

α	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
β	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0

En este capítulo se describió teóricamente el concepto de “Grafo” y “resolución”, se explicaron las técnicas propuestas para la comparación de escenarios de redes WiFi; las cuales fueron nombradas como

“Discretización del escenario” y “Clasificación por radio de cobertura de los APs”. Al finalizar el presente capítulo con la explicación de las implementaciones de las técnicas propuestas y de la validación es posible pasar al siguiente donde se muestran los experimentos realizados, así como los resultados obtenidos.

Capítulo 4

Experimentos y resultados obtenidos

El primer paso de la ignorancia es presumir de saber.

Baltasar Garcían

4.1 Introducción

En este capítulo se introducen los resultados más relevantes del trabajo, estos nos proveen con las herramientas necesarias para establecer si la hipótesis planteada es verdadera o tiene limitaciones.

La estructura del capítulo consiste en el enunciar el Entorno experimental y cómo se realizan las validaciones y los Resultados Experimentales obtenidos.

4.2 Entorno experimental

Para el desarrollo del trabajo se ha empleado el servidor del Departamento de Automática de la Escuela Politécnica Superior con características Ubuntu 22.04, Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz, 32 GB DDR4-2400, SSD. En este se han realizado las simulaciones con el software “**ns-3**” para las validaciones de los métodos desarrollados. Los scripts de python empleados para las comparaciones no precisan de gran carga computacional, solo tener instalado python y las librerías principales empleadas para ello; ha sido de fundamental el empleo de Numpy, Matplotlib, pickle, pandas y networkx.

4.2.1 Bases de datos utilizadas

Se ha creado un set de grafos propios que se emplean tanto para las comparaciones como para las validaciones. La relación de estos grafos se encuentra en la Tabla 4.1, en total son 17 tipos de grafos (cambiando la cantidad de sus clientes) con diversidad de 10 cada uno. Los grafos analizados cuentan con 26 APs y variadas cantidades de usuarios, así como sus ubicaciones, en total se analizan 10 grafos (el de entrada y los de la base de datos) con localización aleatoria para la misma cantidad de usuarios.

Tabla 4.1: Distribución de escenarios estudiados.

Nombre de Grafo/Cantidad de nodos	Cantidad APs	Cantidad STAs
173, 0 al 9, 173	26	147
222, 0 al 9, 222	26	196
271, 0 al 9, 271	26	245
320, 0 al 9, 320	26	294
369, 0 al 9, 369	26	343
400, 0 al 9, 422	26	396
418, 0 al 9, 418	26	392
467, 0 al 9, 467	26	441
500, 0 al 9, 521	26	495
516, 0 al 9, 516	26	490
600, 0 al 9, 616	26	590
700, 0 al 9, 715	26	689
800, 0 al 9, 816	26	790
900, 0 al 9, 916	26	890
1000, 0 al 9, 1013	26	987
1100, 0 al 9, 1111	26	1085
1200, 0 al 9, 1209	26	1183
1300, 0 al 9, 1305	26	1279

4.3 Validación

Los resultados (parejas de grafos más parecidas) de estas técnicas de comparación son validados mediante la simulación de los escenarios WiFi creados para este Trabajo Fin de Máster con el empleo del simulador **ns-3**.

ns-3 es un simulador de redes basado en eventos discretos. Se usa principalmente en ambientes educativos y permite simular protocolos unicast y multicast, utilizándose intensamente en la investigación de redes móviles ad-hoc. Las validaciones se harán recopilando resultados arrojados con este programa, entre los más importantes se encuentran el throughput, la SNR, el Retardo, Jitter y los paquetes transmitidos y recibidos.

Se realizan varias simulaciones, en total 103, atendiendo a los canales de trabajo de cada AP; como se ha comentado en capítulos previos, se pudiera variar otro parámetro como la potencia, pero al ser este un dato que puede alcanzar infinitos valores se decide apostar por la simulación de estos grafos trabajando con variadas configuraciones de canales.

Estas 103 simulaciones se dividen de manera que todos los APs de cada grafo trabajan en el canal 1, 6 u 11, se realizan 50 simulaciones donde los AP trabajan con los canales del 1 al 11 escogidos aleatoriamente y otras 50 simulaciones donde los AP trabajan con los canales ortogonales (1, 6 y 11) escogidos aleatoriamente. Esto se hace con el fin de identificar si existe algún cambio en los resultados de dichas simulaciones y luego comparar con lo obtenido al desarrollar las técnicas explicadas en epígrafes anteriores: discretización del escenario y radio de cobertura de los APs. Los resultados que se analizarán para esta comparación serán el Throughput, Delay y Jitter.

Los resultados se analizan atendiendo a las 103 simulaciones convertidos a 103 valores de Throughput, Delay y Jitter para cada uno de los grafos de las parejas escogidas. Es calculada además la media y desviación típica, empleando para esta última las ecuaciones 3.7 y 3.8.

Los resultados obtenidos en la validación se recogen en el epígrafe 4.4 y se comparan con las técnicas desarrolladas en la investigación, para definir si estos pudieran ser métodos aplicativos a la realidad.

4.4 Resultados experimentales

Las técnicas desarrolladas se programaron en scripts de python mediante el empleo de 170 grafos diferentes en los que varían el número de clientes manteniendo la cantidad y posición de los APs constantes como se observa en la Tabla 4.1, empleando las librerías networkx, numpy, matplotlib, pickle, entre otras.

4.4.1 Resultados según método discretización del escenario

Para la programación de este método se estudian varios escenarios de redes WiFi extrapolados a la estructura de un grafo donde se definen inicialmente dos tipos de nodos principales: los Puntos de Acceso (APs) y los usuarios (STAs), así como sus ubicaciones en el plano coordenado (x; y; z).

Para llevar a cabo la discretización de dichos escenarios se implementa un código el cual es capaz de transformar el grafo objetivo en una matriz con tamaño máximo definido por parámetros (x;y), logrando así contar los clientes por área establecida previamente según la resolución (filas,columnas) que se estime conveniente. De este modo al emplear resoluciones mayores aparecen menos clientes por unidad de área pero también es más fácil que este número se asemeje entre todos los grafos, aunque a mayor resolución mayor es el coste computacional.

Se decide emplear diferentes resoluciones como 2 x 2, 3 x 3, 4 x 4, 6 x 6, 8 x 8 y 16 x 16 para contrastar lo estimado y establecer cuál de ellas sea más apropiada para las futuras comparaciones. A continuación se muestran las subfiguras 4.1a, 4.1b, 4.2a, 4.2b, 4.3a y 4.3b donde se divide al grafo en tres de las resoluciones establecidas y se muestran por marcas de colores la cantidad de usuarios radicados por área definida. Además se comparan dos grafos que posean la misma cantidad de clientes para establecer qué tan parecidos son los grafos ante esta discretización. Los colores de los nodos se dividen de forma que lo que se observa cumple con que entre cero y 19 usuarios se colorean de marrón, entre 20 y 39 de verde y más de 40 de azul.

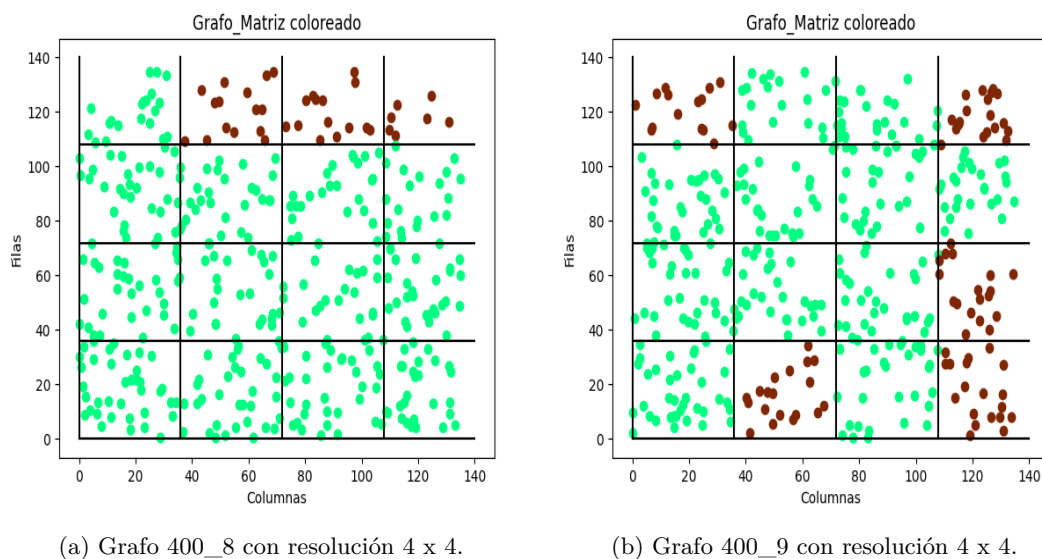


Figura 4.1: Comparación de dos grafos con misma resolución 4 x 4.

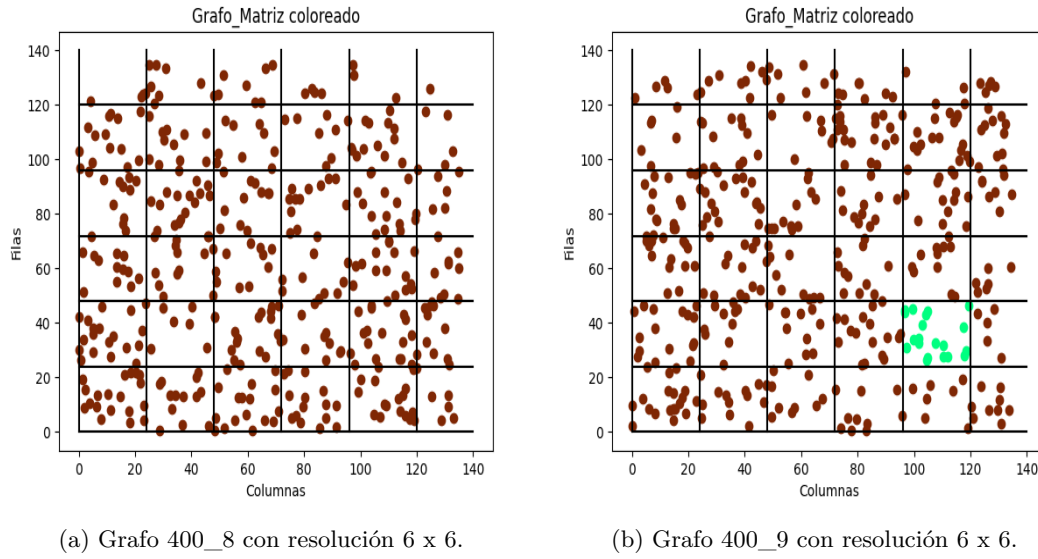


Figura 4.2: Comparación de dos grafos con misma resolución 6 x 6.

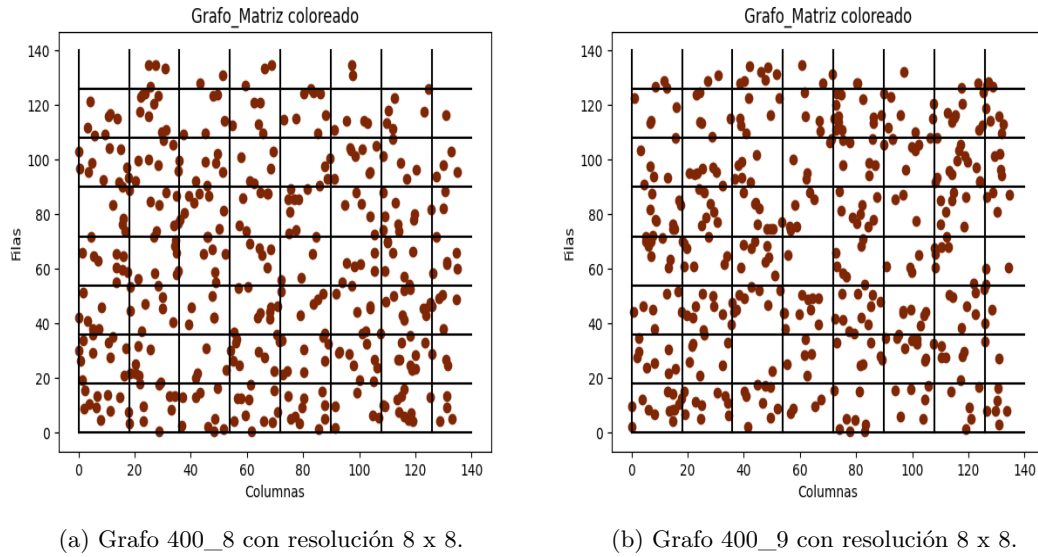


Figura 4.3: Comparación de dos grafos con misma resolución 8 x 8.

Para presentar los resultados se trabaja con los grafos del grupo 400 y los del grupo 600 pertenecientes al set referido en la Tabla 4.1. Para la aplicación de este método se utilizaron las ecuaciones explicadas en el capítulo anterior y sus resultados se muestran en las Tablas B.1, B.2 y B.3, B.4, las cuales presentan la comparación de un grafo de referencia (en este caso el cero) y su comparación con los otros 9. Se anotan los valores de sumatoria de la matriz diferencia absoluta, sumatoria de la matriz diferencia normalizada, media, moda y desviación típica de la matriz diferencia absoluta, para cada una de las 9 comparaciones, esto también para cada una de las resoluciones establecidas.

Para analizar los resultados partiendo de las matrices diferencia calculadas, como los que se encuentran expuestos en las tablas B.1, B.2 y B.3, B.4 se realiza un ranking, donde los menores valores corresponden a los índices de las parejas de grafos más cercanos. Los resultados para ambos escenarios son los que se observan a continuación.

En el caso de los grafos “400” para la Tabla B.1, B.2 se observa que con resolución 2 x 2 los mejores resultados se obtienen para la pareja 400_0 y 400_3. Sin embargo, para la resolución de 3 x 3 se observa que la menor diferencia se encuentra en la comparación con 400_6 y no así la diferencia normalizada, si no que esta se encuentra en la comparación con 400_9; análogamente sucede con la media calculada y la moda. En 4 x 4 los grafos más parecidos son 400_0 y 400_3 y 400_5 indistintamente para la sumatoria de la diferencia y diferencia normalizada. En 6 x 6 se obtienen los mejores resultados para la segunda comparación y en 8 x 8 al igual que en 3 x 3 arroja como el mejor resultado la sexta comparación; sin embargo 16 x 16 obtiene los valores más bajos para la quinta pareja comparada.

Para el grupo de “600” se obtiene para la resolución 2 x 2 la primera comparación como la más parecida; la resolución 3 x 3 muestra diversidad de resultados; en 4 x 4 se presenta indistintamente a las parejas 1 y 6 como posibles soluciones; la resolución de 6 x 6 presenta a la segunda comparación como la mejor; en 8 x 8 no aparece uniformidad en ambas comparaciones y en 16 x 16 la segunda solución se encuentra entre los valores más bajos. Analizando todo el ranking de estas comparaciones se puede observar que la primera pareja comparada se puede tomar como la que mayor similitud presenta, estando también entre los valores más bajos los de la comparación para la pareja 9.

Para grupo de 400:

```
Para 2x2: {3: 10.0, 1: 18.0, 5: 28.0, 7: 40.0, 6: 42.0, 9: 44.0, 2: 45.0, 4: 53.0, 8: 53.0}
Para 2x2 normalizada: {3: 1.0, 1: 3.0, 5: 3.0, 6: 3.0, 7: 3.0, 2: 4.0, 4: 4.0, 8: 4.0,
9: 4.0}
Para 3x3: {6: 38.0, 7: 42.0, 9: 48.0, 5: 50.0, 2: 59.0, 3: 62.0, 8: 71.0, 1: 72.0, 4: 87.0}
Para 3x3 normalizada: {9: 4.0, 2: 5.0, 5: 5.0, 6: 5.0, 7: 5.0, 1: 6.0, 3: 7.0, 8: 7.0,
4: 8.0}
Para 4x4: {3: 64.0, 5: 64.0, 9: 74.0, 2: 79.0, 6: 80.0, 8: 85.0, 7: 86.0, 1: 94.0, 4: 97.0}
Para 4x4 normalizada: {5: 4.0, 3: 6.0, 2: 8.0, 6: 8.0, 9: 8.0, 7: 10.0, 1: 11.0, 4: 11.0,
8: 11.0}
Para 6x6: {2: 105.0, 5: 112.0, 7: 118.0, 8: 125.0, 6: 136.0, 9: 136.0, 3: 142.0, 4: 153.0,
1: 154.0}
Para 6x6 normalizada: {2: 10.0, 5: 12.0, 7: 14.0, 9: 14.0, 3: 16.0, 4: 16.0, 8: 16.0,
6: 17.0, 1: 21.0}
Para 8x8: {6: 162.0, 8: 167.0, 5: 172.0, 2: 175.0, 4: 177.0, 3: 178.0, 1: 190.0, 7: 192.0,
9: 194.0}
Para 8x8 normalizada: {6: 17.0, 8: 17.0, 5: 19.0, 3: 20.0, 4: 20.0, 7: 20.0, 1: 21.0,
2: 22.0, 9: 24.0}
Para 16x16: {5: 322.0, 4: 329.0, 7: 332.0, 1: 334.0, 3: 336.0, 2: 337.0, 6: 342.0, 8: 345.0,
9: 352.0}
Para 16x16 normalizada: {5: 12.0, 2: 15.0, 6: 15.0, 9: 16.0, 4: 17.0, 8: 17.0, 3: 18.0,
1: 19.0, 7: 19.0}
```

Para grupo de 600:

```
Para 2x2: {1: 18.0, 9: 25.0, 2: 31.0, 7: 33.0, 3: 34.0, 6: 41.0, 5: 49.0, 8: 51.0, 4: 64.0}
Para 2x2 normalizada: {1: 2.0, 4: 3.0, 5: 3.0, 6: 3.0, 8: 3.0, 9: 3.0, 2: 4.0, 3: 4.0,
7: 4.0}
Para 3x3: {9: 57.0, 8: 59.0, 2: 65.0, 7: 65.0, 1: 66.0, 6: 73.0, 5: 79.0, 4: 84.0, 3: 94.0}
Para 3x3 normalizada: {1: 5.0, 2: 6.0, 3: 6.0, 4: 6.0, 6: 6.0, 7: 6.0, 8: 6.0, 9: 6.0,
5: 7.0}
Para 4x4: {2: 89.0, 1: 90.0, 6: 91.0, 5: 105.0, 3: 110.0, 7: 117.0, 8: 127.0, 9: 131.0,
4: 140.0}
Para 4x4 normalizada: {1: 8.0, 6: 10.0, 7: 10.0, 2: 11.0, 3: 11.0, 5: 11.0, 8: 11.0, 9: 11.0,
4: 13.0}
Para 6x6: {2: 151.0, 6: 165.0, 8: 169.0, 9: 169.0, 1: 182.0, 4: 188.0, 5: 191.0, 7: 195.0,
```

```

3: 198.0}
Para 6x6 normalizada: {2: 18.0, 6: 20.0, 8: 20.0, 3: 22.0, 4: 22.0, 5: 22.0, 7: 22.0, 9: 22.0,
1: 25.0}
Para 8x8: {3: 212.0, 1: 222.0, 5: 227.0, 2: 229.0, 9: 229.0, 6: 235.0, 7: 235.0, 4: 244.0,
8: 245.0}
Para 8x8 normalizada: {6: 23.0, 9: 23.0, 3: 25.0, 7: 25.0, 4: 27.0, 5: 27.0, 8: 27.0,
1: 29.0, 2: 29.0}
Para 16x16: {1: 390.0, 2: 407.0, 6: 415.0, 7: 415.0, 5: 419.0, 4: 424.0, 8: 425.0, 9: 425.0,
3: 436.0}
Para 16x16 normalizada: {9: 28.0, 2: 29.0, 4: 29.0, 5: 29.0, 7: 32.0, 1: 34.0, 3: 34.0,
6: 35.0, 8: 37.0}

```

Se analiza además que los resultados de la matriz diferencia normalizada son los que más rápido convergen a partir de las discretizaciones de 6x6, 8x8 y de 16x16. Como se pretende ahorrar en gasto computacional, se escoge como método válido para futuras comparaciones la resolución de 6x6 y el cálculo de la matriz diferencia normalizada para analizar las parejas de matrices más parecidas.

Luego que se escogen las características a aplicar a las comparaciones, en este caso la resolución de 6x6 con la sumatoria de la matriz diferencia normalizada se realizan los cálculos comparativos solo con esta configuración y se obtienen los resultados de las parejas más similares. En el caso del grupo “400” una pareja con bajos resultados sería la quinta [4.4a](#), [4.4b](#) y para el grupo “600” sería la primera [4.5a](#), [4.5b](#). Estas parejas son las medidas posteriormente en las validaciones para corroborar que en las simulaciones estas similitudes son verdaderas; aunque luego para ampliar el espectro de tener una comparación eficiente se comparan estos resultados con todos los de las demás parejas.

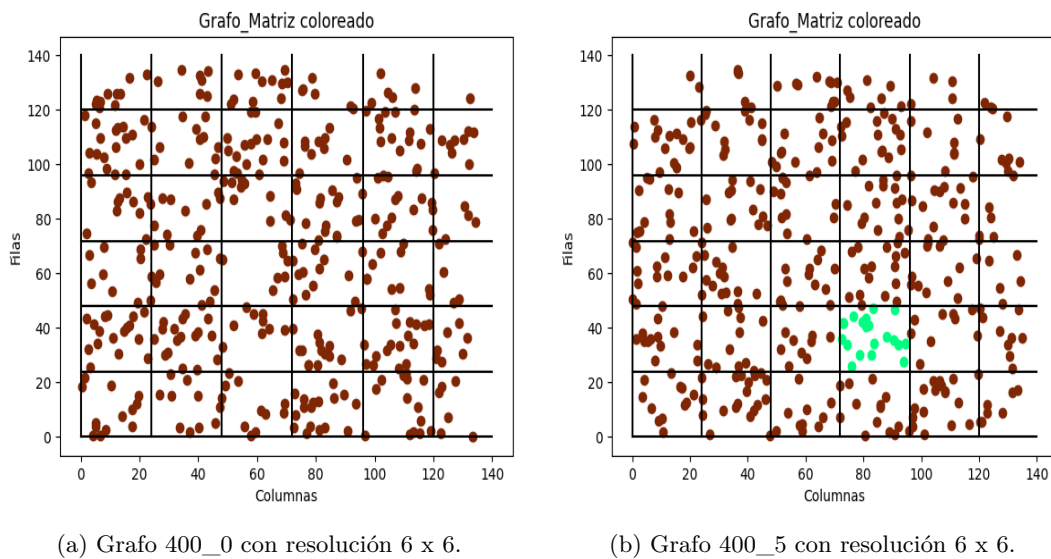


Figura 4.4: Parejas similares resultado de comparación.

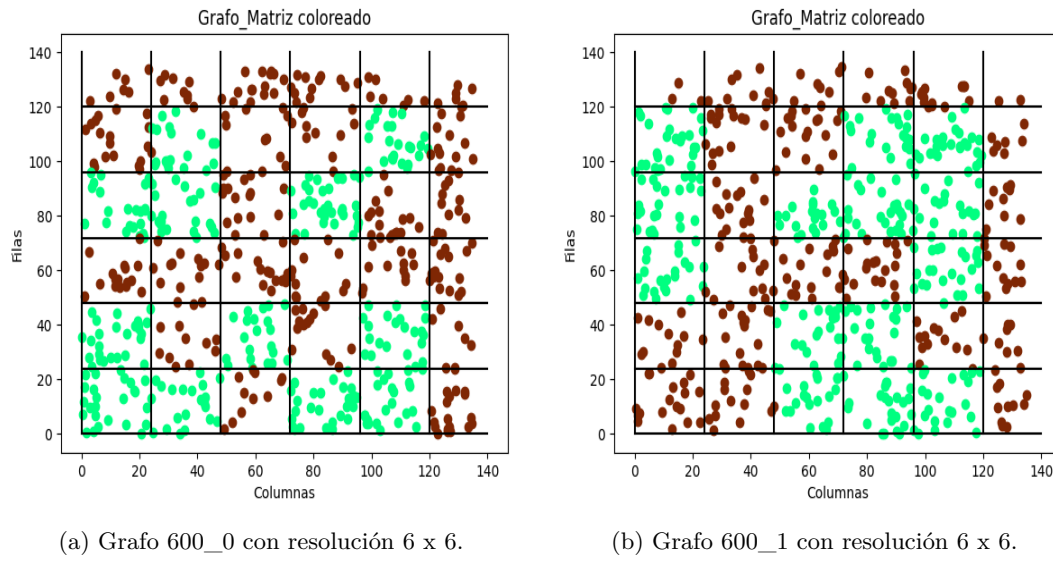


Figura 4.5: Parejas similares resultado de comparación.

4.4.2 Resultados según método clasificación por radios de cobertura de los APs

Para el análisis de esta técnica luego de obtener los resultados para los dos grupos que se están comparando, se establece un ranking de los resultados de la sumatoria de la matriz diferencia y de la sumatoria de la matriz diferencia normalizada. Se observa en las tablas B.5, B.6, B.7 y B.8 que los resultados normalizados se pueden tomar para determinar los menores resultados en cuanto a las similitudes para cada una de las parejas comparadas.

Para grupo de 400:

```
Hasta 5: {3: 29.0, 8: 29.0, 4: 33.0, 5: 33.0, 6: 35.0, 7: 37.0, 1: 41.0, 9: 41.0, 2: 44.0}
Hasta 5 normalizada: {8: 16.0, 7: 18.0, 3: 19.0, 4: 19.0, 9: 19.0, 1: 21.0, 5: 21.0, 6: 22.0, 2: 23.0}
Entre 5 y 10: {7: 58.0, 3: 59.0, 5: 61.0, 2: 66.0, 6: 66.0, 9: 70.0, 4: 74.0, 1: 79.0, 8: 80.0}
Entre 5 y 10 normalizada: {5: 20.0, 2: 22.0, 3: 22.0, 9: 22.0, 4: 23.0, 7: 23.0, 1: 24.0, 6: 25.0, 8: 26.0}
Entre 10 y 15: {6: 54.0, 2: 76.0, 5: 77.0, 3: 79.0, 8: 82.0, 9: 85.0, 1: 86.0, 7: 99.0, 4: 100.0}
Entre 10 y 15 normalizada: {6: 21.0, 1: 22.0, 2: 22.0, 5: 22.0, 7: 23.0, 3: 24.0, 4: 24.0, 8: 24.0, 9: 24.0}
Entre 15 y 20: {5: 61.0, 4: 73.0, 9: 76.0, 2: 87.0, 8: 88.0, 7: 91.0, 3: 96.0, 6: 99.0, 1: 109.0}
Entre 15 y 20 normalizada: {5: 20.0, 2: 22.0, 4: 22.0, 8: 23.0, 7: 24.0, 9: 24.0, 1: 25.0, 6: 25.0, 3: 26.0}
Entre 20 y 25: {6: 69.0, 7: 87.0, 1: 88.0, 3: 93.0, 9: 96.0, 2: 97.0, 4: 103.0, 8: 108.0, 5: 117.0}
Entre 20 y 25 normalizada: {1: 22.0, 2: 22.0, 7: 22.0, 8: 23.0, 5: 24.0, 9: 24.0, 3: 25.0, 4: 25.0, 6: 25.0}
Entre 25 y 30: {4: 86.0, 7: 92.0, 1: 102.0, 5: 119.0, 2: 120.0, 3: 123.0, 9: 124.0, 6: 133.0, 8: 133.0}
Entre 25 y 30 normalizada: {2: 23.0, 3: 23.0, 7: 23.0, 9: 23.0, 4: 25.0, 5: 25.0, 8: 25.0, 1: 26.0, 6: 26.0}
```

Para grupo de 600:

```

Hasta 5: {1: 31.0, 9: 36.0, 6: 38.0, 3: 40.0, 8: 42.0, 5: 44.0, 7: 46.0, 4: 48.0, 2: 54.0}
Hasta 5 normalizada: {1: 17.0, 6: 19.0, 3: 20.0, 4: 20.0, 7: 20.0, 5: 21.0, 8: 21.0, 9: 21.0, 2: 22.0}
Entre 5 y 10: {6: 55.0, 9: 55.0, 4: 63.0, 2: 66.0, 5: 70.0, 8: 74.0, 7: 75.0, 3: 77.0, 1: 81.0}
Entre 5 y 10 normalizada: {4: 20.0, 9: 21.0, 2: 22.0, 3: 22.0, 5: 22.0, 7: 22.0, 8: 22.0, 6: 24.0, 1: 25.0}
Entre 10 y 15: {1: 87.0, 3: 87.0, 4: 88.0, 2: 93.0, 5: 100.0, 7: 102.0, 9: 110.0, 6: 112.0, 8: 114.0}
Entre 10 y 15 normalizada: {5: 20.0, 8: 21.0, 1: 23.0, 3: 23.0, 4: 23.0, 2: 24.0, 6: 24.0, 7: 24.0, 9: 25.0}
Entre 15 y 20: {2: 100.0, 7: 103.0, 4: 104.0, 5: 105.0, 1: 109.0, 9: 114.0, 6: 117.0, 3: 131.0, 8: 146.0}
Entre 15 y 20 normalizada: {5: 22.0, 3: 23.0, 4: 23.0, 7: 23.0, 2: 24.0, 1: 25.0, 6: 25.0, 9: 25.0, 8: 26.0}
Entre 20 y 25: {9: 110.0, 7: 118.0, 8: 119.0, 1: 123.0, 3: 125.0, 2: 132.0, 6: 134.0, 5: 141.0, 4: 146.0}
Entre 20 y 25 normalizada: {5: 23.0, 7: 23.0, 8: 23.0, 1: 24.0, 3: 24.0, 9: 24.0, 2: 25.0, 4: 25.0, 6: 25.0}
Entre 25 y 30: {6: 94.0, 8: 104.0, 4: 109.0, 7: 120.0, 9: 130.0, 1: 145.0, 5: 148.0, 2: 156.0, 3: 157.0}
Entre 25 y 30 normalizada: {1: 20.0, 5: 23.0, 4: 24.0, 6: 24.0, 7: 24.0, 8: 24.0, 2: 25.0, 9: 25.0, 3: 26.0}

```

Parecido al análisis que se realiza con el primer método se hace el siguiente, donde se observa al realizar un ranking desde las parejas con los menores valores hasta los mayores tanto para la sumatoria de la matriz diferencia como para la sumatoria de la matriz diferencia normalizada, para los grafos del grupo “400” y los del grupo “600” se obtiene que para el primer grupo las parejas más parecidas son 3, 5 y 6 indistintamente y para el grupo de 600 las que corresponden a los índices primero, cuarto y noveno. Se observa que estos resultados poseen algunas similitudes con los del método anterior por lo que se eligen para el grupo “400” la pareja número 5 y para el grupo “600” la pareja número 1 para aplicarles las validaciones y corroborar la veracidad de estas semejanzas.

4.4.3 Resultados de las validaciones

Como se comenta en epígrafes anteriores se escogen para validar los métodos mediante las simulaciones en “ns-3” para el grupo de “400” la pareja de grafos 400_0 y 400_5 y para el grupo “600” la pareja de grafos 600_0 y 600_1, por estar dentro de las parejas de grafos más parecidas. Para dichas simulaciones se medirán los valores de Throughput, Delay y Jitter. Se calcularán las diferencias entre estos valores para cada grafo de la pareja escogida para el total de simulaciones que como ya se ha explicado son 103. Estas diferencias deberán ser los valores más bajos dentro del conjunto de escenarios con los que se comparó.

Para el cálculo del Throughput en las simulaciones con “ns-3” se emplea la siguiente ecuación [81], [93]. Donde se toman los bytes que se envían y se convierten a bits al multiplicar por 8, se divide entre el tiempo que se tarda en recibir. Este resultado se lleva a Kbps por lo que se divide entre 1024, por lo que todos los valores de Throughput que son calculados se dan en esta unidad.

```
Throughput: i->second.rxBytes * 8.0 / (i->second.timeLastRxPacket.GetSeconds ())
```

```
- i->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds () / 1024
```

Donde “rxBytes”, es el número total de bytes recibidos en el flujo, “timeLastRxPacket”, contiene el tiempo absoluto en el que se recibió el último paquete en el flujo, es decir, el momento en el que finaliza la recepción del flujo y “timeFirstTxPacket”, se refiere al tiempo absoluto en el que se transmitió el primer paquete en el flujo, es decir, el momento en el que comienza la transmisión del flujo.

Atendiendo a los resultados de las Tablas B.9, B.10, B.11, B.12, que corresponden a los Throughputs de las parejas de grafos simuladas tanto para el grupo de “400” como para el de “600”, se obtienen los siguientes valores de Throughput mínimo, máximo, media y desviación típica para las 103 simulaciones. Los resultados son los que se observan en la tabla 4.2. Se observa que los valores mínimos siempre ocurren en la primera simulación, la cual empleaba los mismos canales para todos los APs (en este caso el 1), por lo que la interferencia es más elevada y el rendimiento cae; y los máximos para ambas parejas de escenarios están en un rango parecido de simulaciones, siempre coincidiendo con las simulaciones que se lanzaban empleando canales aleatorios para todos sus APs (del 1-11), estas corresponden a las simulaciones de la 53 a la 102; comenzando por el índice 0. Al comparar dichas parejas con los resultados calculados en las tablas 4.3 y 4.4; se observa que estos grafos también presentan su mayor rendimiento en el mismo rango de simulaciones; pero los más parecidos y por ende con menor resultado en su diferencia son los escogidos por los métodos, estos índices se presentan en las tablas al lado de los valores de throughput máximo y mínimo.

Entre los dos métodos aplicados y las validaciones realizadas con el software “ns-3”, se observa que la comparación 5 (grafos 400_0 y 400_5) obtiene buenos resultados, por lo que si el grafo número 5 está en en nuestra base de datos con configuraciones preestablecidas que garantizan su estado óptimo, y el escenario 0 fuera un caso real al cual haya que aplicarle algún tipo de optimización para mejorar su rendimiento esto ya no sería necesario ya que se le aplicaría la configuración guardada del grafo 5 de nuestra base de datos. Sin embargo se puede observar que el grafo 400_6 posee valores muy parecidos al 400_0, como se veía también al aplicar los métodos desarrollados. Paralas parejas de 600_0 y 600_1 los resultados son muy similares, pero se observan gran parecido en la comparación con el 600_4, igual a como se obtenía con los métodos presentados.

Tabla 4.2: Resultados de simulaciones de parejas de grafos más parecidas en “ns-3”.

Grafos	Th mín (Kbps)	Th máx (Kbps)	Media (μ) (Kbps)	Desv. típica (σ)
400_0	0; 15.91272	72; 15.91273	15.91273	1.779e-09
400_5	0; 15.91272	63; 15.91273	15.91273	1.824e-09
600_0	0; 15.90746	64; 15.90748	15.90747	2.933e-09
600_1	0; 15.91373	85; 15.91375	15.913753	3.063e-09

El delay o retardo se calcula en las simulaciones como se observa en la siguiente ecuación [81], [93], donde “delaySum” corresponde a la suma de todos los retardos extremo a extremo de todos los paquetes recibidos del flujo y “rxPackets” al número total de paquetes recibidos en el flujo.

```
Delay: i->second.delaySum.GetSeconds () / i->second.rxPackets
```

Para el caso del retardo pasa parecido dado que los menores y en este caso las mejores simulaciones se obtienen en las del mismo rango donde el throughput era máximo, (53-102), los índices para ver lo comentado se presentan en las tablas al lado de los valores de delay máximo y mínimo. Se observa como

Tabla 4.3: Resultados de simulaciones de demás grafos en “ns-3”.

Grafos	Th mín (Kbps)	Th máx (Kbps)	Media (μ) (Kbps)	Desv. típica (σ)
400__1	0; 15.90149	71; 15.90150	15.90150	2.255e-09
400__2	0; 15.90461	93; 15.9046	15.90462	2.019e-09
400__3	0; 15.92388	64; 15.92389	15.923889	2.357e-09
400__4	0; 15.90461	56; 15.904623	15.904621	1.864e-09
400__6	0; 15.9127	60; 15.9127	15.912728	1.787e-09
400__7	0; 15.91272	62; 15.9127	15.9127288	1.924e-09
400__8	0; 15.9046133	97; 15.90462	15.904622	2.129e-09
400__9	0; 15.923879	53; 15.92389	15.9238898	2.482e-09

Tabla 4.4: Resultados de simulaciones de demás grafos en “ns-3”.

Grafos	Th mín (Kbps)	Th máx (Kbps)	Media (μ) (Kbps)	Desv. típica (σ)
600__2	0; 15.904705	64; 15.904724	15.904721	3.513e-09
600__3	0; 15.91373	89; 15.91375	15.9137532	3.162e-09
600__4	0; 15.90982	61; 15.90984	15.9098408	2.906e-09
600__5	0; 15.915267	95; 15.91528	15.9152815	3.153e-09
600__6	0; 15.890329	77; 15.8903488	15.8903453	3.489e-09
600__7	0; 15.91989	98; 15.9199	15.91990805	3.381e-09
600__8	0; 15.89033	53; 15.89034	15.8903454	3.282e-09
600__9	0; 15.9047	93; 15.9047	15.904721	3.238e-09

el grafo 400__0 posee más semejanza en este aspecto con otros grafos como el 400__2 el cual no se detectó como favorito en ninguno de los dos métodos planteados y el 400__6 que si era una de las mejores soluciones antes establecidas, sin embargo las métricas con el escogido son aceptables esto se puede observar en las tablas 4.5, 4.6, B.13, B.14, B.15 y B.16. Para el caso del 600__0 existe un poco más de diversidad en las métricas así como los resultados que aportaban los métodos desarrollados en este trabajo, se ve además que una buena opción era la similitud de este con el grafo 600__9, siendo uno de los identificados como posible candidato en los experimentos previos con los métodos propuestos.

Tabla 4.5: Resultados de simulaciones de parejas de grafos más parecidas en “ns-3”.

Grafos	Delay mín (seg)	Delay máx (seg)	Media (μ) (seg)	Desv. típica (σ)
400__0	78; 0.00023698	0; 0.00030278	0.00024773	1.162e-05
400__5	100; 0.00023588	0; 0.000303446	0.000247568	1.210e-05
600__0	81; 0.000239269	0; 0.00035366	0.000254838	1.987e-05
600__1	85; 0.00023784	0; 0.00034849	0.00025397	1.920e-05

Tabla 4.6: Resultados de simulaciones de demás grafos en “ns-3”.

Grafos	Delay mín (seg)	Delay máx (seg)	Media (μ) (seg)	Desv. típica (σ)
400__1	77; 0.000238557	0; 0.000303698	0.000248619	1.173e-05
400__2	65; 0.000236496	0; 0.000303152	0.000247678	1.190e-05
400__3	89; 0.00023565	0; 0.000302101	0.0002473287	1.206e-05
400__4	79; 0.00023668	0; 0.00030327	0.00024737	1.185e-05
400__6	81; 0.000236431	0; 0.000301981	0.000247826	1.182e-05
400__7	59; 0.000235801	0; 0.000303055	0.000246727	1.219e-05
400__8	89; 0.00023525	0; 0.00030279	0.00024675	1.187e-05
400__9	72; 0.00023652	0; 0.0003035266	0.000247307	1.204e-05

Tabla 4.7: Resultados de simulaciones de demás grafos en “ns-3”.

Grafos	Delay mín (seg)	Delay máx (seg)	Media (μ) (seg)	Desv. típica (σ)
600__2	65; 0.000237247	0; 0.00035175	0.000254178	2.024e-05
600__3	91; 0.0002388296	0; 0.00034827	0.000254416	1.931e-05
600__4	98; 0.00023965	0; 0.00034963	0.000255033	1.942e-05
600__5	86; 0.0002365	0; 0.000346177	0.0002521321	1.941e-05
600__6	68; 0.0002381415	0; 0.00035066	0.000254254	1.965e-05
600__7	66; 0.000237248	0; 0.000349976	0.0002541195	1.969e-05
600__8	89; 0.000238449	0; 0.00035064	0.00025375	1.955e-05
600__9	93; 0.00023913	0; 0.000351375	0.0002550291	1.955e-05

Para el análisis de la extracción del cálculo del jitter se emplea la ecuación siguiente [81], [93], donde “jitterSum” corresponde a la suma de todas las variaciones de retardo de extremo a extremo (jitter) para todos los paquetes recibidos del flujo. Se define el jitter de un paquete como la variación de retardo en relación al último paquete de la secuencia, es decir, $Jitter\{P_N\} = \|Retardo\{P_N\} - Retardo\{P_{N-1}\}\|$. Esta definición se basa en la definición de la IETF RFC 3393; y “rxPackets” se explicó previamente para el cálculo del retardo.

```
Jitter: i->second.jitterSum.GetSeconds () / (i->second.rxPackets - 1)
```

En el caso de Jitter los menores valores se encuentran en las últimas simulaciones B.17, B.18, B.19 y B.20, como pasaba con los demás parámetros medidos, que las reflejan como las que obtienen mejores resultados, estos índices se presentan en las tablas al lado de los valores de jitter máximo y mínimo. En cuanto a las métricas se observa un mayor parecido de 400__0 con los escenarios de 400__4 y 400__6 donde se identifica al segundo como otro grafo potencial en similitud dado que tanto como para los métodos propuestos como en las simulaciones ha obtenido relevantes resultados. En el caso del 600__0 si posee resultados similares para la pareja escogida pero también con el grafo 600__9 resultado recurrente durante todo el proceso, esto se puede corroborar en las Tablas 4.8, 4.9 y 4.10.

Tabla 4.8: Resultados de simulaciones de parejas de grafos más parecidas en “ns-3”.

Grafos	Jitter mín (seg)	Jitter máx (seg)	Media (μ) (seg)	Desv. típica (σ)
400__0	78; 6.068453e-05	0; 0.0001602033	7.7831052e-05	1.777e-05
400__5	100; 5.8970369e-05	0; 0.0001612033	7.76846171e-05	1.851e-05
600__0	81; 6.420339e-05	0; 0.00022781535	8.80208265e-05	2.879e-05
600__1	85; 6.2192952e-05	0; 0.0002222286	8.706162459e-05	2.808e-05

Tabla 4.9: Resultados de simulaciones de demás grafos en “ns-3”.

Grafos	Jitter mín (seg)	Jitter máx (seg)	Media (μ) (seg)	Desv. típica (σ)
400__1	60; 6.29090e-05	0; 0.00016085	7.8814043e-05	1.785e-05
400__2	65; 6.028339e-05	0; 0.000161599	7.8126950e-05	1.829e-05
400__3	89; 5.854506e-05	0; 0.00015786	7.693990238e-05	1.828e-05
400__4	79; 6.077271e-05	0; 0.000161196	7.7784870e-05	1.812e-05
400__6	81; 6.000376e-05	0; 0.00015893	7.80345003e-05	1.802e-05
400__7	59; 5.894966e-05	0; 0.000160506	7.62907329e-05	1.868e-05
400__8	89; 5.834577e-05	0; 0.00016035	7.67063185e-05	1.812e-05
400__9	72; 5.9977858e-05	0; 0.00015948	7.68520579e-05	1.818e-05

Tabla 4.10: Resultados de simulaciones de demás grafos en “ns-3”.

Grafos	Jitter mín (seg)	Jitter máx (seg)	Media (μ) (seg)	Desv. típica (σ)
600__2	65; 6.209298e-05	0; 0.000226288	8.794833699e-05	2.947e-05
600__3	91; 6.38578e-05	0; 0.000222111	8.7858351e-05	2.830e-05
600__4	98; 6.535136e-05	0; 0.000222587	8.8986947e-05	2.819e-05
600__5	95; 6.092226e-05	0; 0.00021715	8.4973307e-05	2.805e-05
600__6	68; 6.312901e-05	0; 0.00022379	8.79416581e-05	2.838e-05
600__7	66; 6.225635e-05	0; 0.00022363	8.778184127e-05	2.8527e-05
600__8	89; 6.332702e-05	0; 0.00022400	8.68742144e-05	2.833e-05
600__9	101; 6.474030e-05	0; 0.000225626	8.91972533e-05	2.841e-05

En conclusión para los parámetros medidos en las simulaciones se observan buenos resultados que permiten validar los métodos de clasificación propuestos dado que demuestran la similitud de las parejas escogidas pero también de otros grafos que se comentaron en dichos métodos los cuales arrojaban gran parecido con el objeto de comparación. Por lo que se concluye, que al grafo 400_0 se le pudieran aplicar las configuraciones óptimas de un escenario tipo (óptimo) 400_5 pero también de un 400_6 y al 600_0, un 600_1 y además 600_9. Además de los tres parámetros escogidos para las validaciones el Throughput es el que más se acerca a los resultados de los métodos de clasificación planteados en este trabajo.

4.4.4 Resultados obtenidos con interfaz de usuario

Como parte de los objetivos de este trabajo se encontraba el de desarrollar los métodos estudiados en scripts con una interfaz de usuario para que fuese más fácil la interacción de un futuro usuario que precise utilizar alguno de ellos. En el caso del método primero se piden datos como la ubicación de los grafos a comparar, así como sus resoluciones y valores máximos de los ejes de coordenadas dado que los mínimos están por defecto en cero. Para el segundo solo se piden las rutas de los escenarios en el ordenador que se esté ejecutando este. En la pantalla de visualización se muestran los resultados recogidos en las tablas presentadas en subepígrafes anteriores, esto se puede ver en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8.

```

C:\Program Files\WindowsApps\PythonSoftwareFoundation.Python.3.9_3.9.3568.0_x64_qbz5n2kfra8p0\python3.9.exe
Inserte la direccion de grafo 1: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_0.pk
Inserte la direccion de grafo 2: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_1.pk
Inserte la resolucion (F,C): 04,04
Inserte el rango máximo en x: 140
Inserte el rango máximo en y: 140
4,4
Diferencia:
[[ 4.  9.  9.  3.]
 [ 5.  3.  5.  4.]
 [ 3.  0.  4. 12.]
 [ 2. 11. 15.  5.]]
sum diferencia-> 94.0
Media de matriz diferencia: 5.875
La moda de matriz origen es: 27.0
La moda de matriz destino es: 28.0
La moda de matriz diferencia es: 3.0
Desviación típica: 3.9823830805184977
diferencia normalizada-> [[1. 1. 1. 0.]
 [1. 0. 1. 1.]
 [0. 0. 1. 1.]
 [0. 1. 1. 1.]]
suma diferencia normalizada-> 11.0
Presione Enter para salir...

```

Figura 4.6: Resultados con método Discretización del escenario vistos por consola.

```

C:\Program Files\WindowsApps\PythonSoftwareFoundation.Python.3.9_3.9.3568.0_x64_qbz5n2kfra8p0\python3.9.exe
Inserte la direccion de grafo 1: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_0.pk
Inserte la direccion de grafo 2: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_1.pk
396
394
[[ 1.  0.  1.  8.  2.  5.]
 [ 2.  5.  1.  7.  6.  2.]
 [ 3.  6.  4. 10.  8.  1.]
 [ 1.  5.  5.  4.  5.  5.]
 [ 2.  2.  3.  7.  0. 10.]
 [ 2.  2.  0.  4.  3.  6.]
 [ 2.  2.  0.  4.  6. 10.]
 [ 1.  4.  0.  2.  6.  2.]
 [ 0.  2.  0.  3.  6.  4.]
 [ 2.  5.  7.  1.  9.  5.]
 [ 0.  2.  9.  5.  5.  2.]
 [ 0.  6.  4.  3.  5.  8.]
 [ 1.  0.  8.  2.  3.  3.]
 [ 2.  5.  1.  0.  0.  6.]
 [ 4.  3.  3.  2.  1.  2.]
 [ 4.  2.  4.  2.  1.  1.]
 [ 2.  2.  3.  8.  3.  1.]
 [ 0.  1.  5.  3.  0.  4.]
 [ 2.  6.  7.  5.  3.  3.]
 [ 1.  5.  7.  3.  6.  3.]
 [ 2.  1.  5.  5.  1.  3.]
 [ 2.  1.  2.  9.  5.  6.]
 [ 2.  5.  1.  4.  0.  4.]
 [ 0.  4.  1.  1.  1.  4.]
 [ 2.  2.  3.  4.  1.  1.]
 [ 1.  1.  2.  3.  2.  1.]]
[1.08035169 1.91111665 2.62779859 2.5422466  2.60291143 2.54079147]
Suma de matriz diferencia [ 41.  79.  86. 109.  88. 102.]
Media de matriz diferencia: [1.57692308 3.03846154 3.30769231 4.19230769 3.38461538 3.92307692]
La moda de matriz diferencia es: [2. 2. 1. 3. 1. 1.]

```

Figura 4.7: Resultados con método por radio de cobertura vistos por consola.

```

La moda de matriz diferencia es: [2. 2. 1. 3. 1. 1.]
MATRIZ DIFERENCIA NORMALIZADA---->
[[1.  0.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  0.  1.]
 [1.  1.  0.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  0.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  0.  1.  1.  1.]
 [0.  1.  0.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [0.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [0.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  0.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  0.  0.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  0.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  0.  1.]
 [0.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
 [1.  1.  1.  1.  1.  1.]
Suma de matriz dif normalizada [21. 24. 22. 25. 22. 26.]
Presione Enter para salir...

```

Figura 4.8: Resultados con método por radio de cobertura vistos por consola (cont.).

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

En este apartado se resumen las conclusiones obtenidas y se proponen las futuras líneas de investigación que se deriven del trabajo.

Para completar el objetivo principal que consiste en estudiar y desarrollar una solución que permita comparar escenarios de redes inalámbricas, principalmente basadas en redes 802.11, estableciendo si soluciones obtenidas previamente para un escenario tipo son aplicables a nuevos escenarios se desglosaron objetivos específicos los cuales a lo largo del desarrollo del trabajo se fueron cumpliendo.

Para el estudio de los escenarios de redes WiFi, se analizan escenarios sencillos para lograr buscar y clasificar posibles elementos a comparar según sus parámetros principales, como por ejemplo: canales de trabajo, potencia de transmisión, área de cobertura, entre otros. Esto permitió encontrar métodos de clasificación de escenarios WiFi que mediante su abstracción a una estructura de grafo dejara analizar sus características para lograr dichas comparaciones. A la par fue necesario crear un set de grafos para trabajar con estos. Las técnicas de comparación fueron implementadas en scripts de python sobre dichos grafos (como redes WiFi) creados también en python.

La validación de las técnicas propuestas se realizó por medio de la comparación de los resultados de las técnicas desarrolladas en el trabajo con los de las simulaciones en el software “**ns-3**”. En este caso se escogieron los resultados de Throughput, Delay y Jitter.

Además se ha desarrollado una interfaz de usuario con el objetivo de acceder de forma sencilla a las técnicas implementadas. La interfaz de usuario se desarrolló mediante consola, donde el usuario debe insertar la ruta de los grafos objeto de comparación y otros elementos en función del tipo de técnica escogida. Esto permite a un futuro investigador en el tema que proponga otros métodos o que precise la utilización de los propuestos en este trabajo el acceso a los resultados de forma rápida e interactiva.

5.1 Conclusiones

Luego de desarrollar y cumplir los objetivos propuestos en este trabajo y analizar los resultados obtenidos en el Capítulo 4, se enuncian las siguientes conclusiones:

- El estudio de los escenarios de redes WiFi permitió identificar y clasificar diferentes comparativas según parámetros principales como canales de trabajo, esto proporcionó una base sólida para el desarrollo de técnicas de comparación de escenarios.

- Se definieron y aplicaron técnicas de comparación de escenarios mediante la implementación de scripts en Python. Estas técnicas aprovecharon la estructura matemática de grafos como una forma de abstracción de las redes inalámbricas.
- La clasificación de grafos mediante métodos comparativos es un factor relevante para la optimización de redes WiFi.
- Las simulaciones en softwares aportan resultados aplicables a un escenario real pero conllevan tiempos elevados y gastos computacionales excesivos.
- Se logra validar los métodos desarrollados mediante las simulaciones en “**ns-3**”; sin embargo sería necesario implementar un factor de tolerancia que permita aportar más de un grafo como solución, dado que las validaciones aportan similitudes con otros grafos también identificados en dichos métodos.
- Entre los métodos implementados es más certero y posee un mejor acabado el método de Clasificación por Discretización del escenario, esto se observa en los resultados obtenidos.
- Se desarrolló una interfaz de usuario a través de consola para facilitar el acceso a las técnicas implementadas, la cual es capaz de proporcionar una experiencia sencilla y conveniente para el usuario.

El estudio y análisis de los escenarios de redes WiFi, junto con la implementación de técnicas de comparación, la validación a través de simulaciones y el desarrollo de una interfaz de usuario, permitieron alcanzar los objetivos establecidos. Estos resultados brindan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de las redes inalámbricas, específicamente las del estándar 802.11.

5.2 Líneas futuras

Como propuestas para estudios o implementación de líneas futuras se sugieren las siguientes ideas:

- Aplicar otro método a la técnica de comparación de grafos que emplee alguno de los algoritmos GED enunciados en el Capítulo 2 para la comparación y validación de los escenarios WiFi.
- Aplicar otro método de comparación como la clasificación por centroides a los escenarios WiFi.
- Aumentar el set de escenarios WiFi para comparaciones y validaciones, mientras más análisis se realicen los resultados obtenidos poseerán mayor robustez.
- En el cálculo para la Calibración incluir otras técnicas en la ecuación que se puedan desarrollar para obtener un resultado más fehaciente.
- Realizar simulaciones variando otros parámetros, como la potencia de transmisión, además de los canales que es la propuesta de simulación que se ha utilizado.
- Mejorar la interfaz de usuario para futuras utilidades.

Bibliografía

- [1] J. Kurose y K. W. Ross, *Redes de computadoras*. Pearson educación, 2010, vol. 5.
- [2] *El número de usuarios de internet en el mundo crece un 4 % y roza los 5.000 millones (2022) - Marketing 4 Ecommerce - Tu revista de marketing online para e-commerce*. dirección: <https://marketing4ecommerce.net/usuarios-de-internet-mundo/> (visitado 19-08-2022).
- [3] *La Alianza Wi-Fi analiza las tendencias del protocolo inalámbrico que marcarán el 2022 • CASADOMO*. dirección: <https://www.casadomo.com/2022/01/27/alianza-wi-fi-analiza-tendencias-protocolo-inalambrico-marcaran-202> (visitado 19-08-2022).
- [4] L. D'Andrea, *Tendencias en movilidad: Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E*, en. dirección: <https://gblogs.cisco.com/la/tendencias-en-movilidad-wi-fi-6-y-wi-fi-6e/> (visitado 23-08-2022).
- [5] J. R. Sánchez y J. V. D. Martínez, *Las redes inalámbricas, más ventajas que desventajas*. dirección: www.uv.mx/iiesca/files/2012/12/redes2008-2.pdf (visitado 18-08-2022).
- [6] M. Terol, *El papel de las redes inalámbricas en las comunicaciones empresariales*. dirección: <https://empresas.blogthinkbig.com/redes-inalambricas-empresa-comunicaciones/> (visitado 19-08-2022).
- [7] M. Sena, *¿Cuáles son los retos de las redes inalámbricas en América Latina?* Dirección: <https://gblogs.cisco.com/la/en-msena-cuales-son-los-retos-de-las-redes-inalambricas-en-america-latina/> (visitado 23-08-2022).
- [8] *Encuesta sobre Equipamiento y Uso de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en los Hogares. Año 2022*. Instituto Nacional de Estadística. Agencia de gobierno. Nota de prensa, nov. de 2022. dirección: https://www.ine.es/prensa/tich_2022.pdf.
- [9] J. U. Gonzalez Villalobos et al., “Comparación entre el Estándar IEEE 802.11 ax y el estándar IEEE 802.11 ac para determinar la evolución del rendimiento de las Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN)”, 2020.
- [10] C. V. Loayza Loayza, “Estudio del Rendimiento del Estándar 802.11 en la Comparación con Dispositivos con el Estándar 802, 11B/G en la Transmisión de Datos”, B.S. thesis, 2011.
- [11] D. G. López López, “Evaluación del estándar IEEE 802.11 ac con tecnología mu-mimo en comparación al estándar de fibra óptica en redes de transporte de datos”, B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas ..., 2018.
- [12] A. Morales Rodriguez y D. Rojas Barros, “Comparación de las aplicaciones entre el estandar WIFI 201.11 G y el futuro estandar WIFI 802.11 N”, B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2007.
- [13] R. Limia Jurado y A. Miguel Hernández, “Estudio del uso del simulador OMNeT++ para la evaluación de escenarios celulares y multisalto con WLAN”, B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.

- [14] J. M. Gimenez-Guzman, I. Marsa-Maestre, D. Orden, E. de la Hoz y T. Ito, "On the Goodness of Using Orthogonal Channels in WLAN IEEE 802.11 in Realistic Scenarios", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, págs. 1-11, nov. de 2018. DOI: [10.1155/2018/5742712](https://doi.org/10.1155/2018/5742712).
- [15] I. Marsa-Maestre, E. de la Hoz, J. M. Gimenez-Guzman, D. Orden y M. Klein, "Nonlinear Negotiation Approaches for Complex-Network Optimization: A Study Inspired by Wi-Fi Channel Assignment", *Group Decision and Negotiation*, vol. 28, n.º 1, págs. 175-196, nov. de 2018. DOI: [10.1007/s10726-018-9600-z](https://doi.org/10.1007/s10726-018-9600-z).
- [16] D. Orden, J. Gimenez-Guzman, I. Marsa-Maestre y E. de la Hoz, "Spectrum Graph Coloring and Applications to Wi-Fi Channel Assignment", *Symmetry*, vol. 10, n.º 3, pág. 65, mar. de 2018. DOI: [10.3390/sym10030065](https://doi.org/10.3390/sym10030065).
- [17] E. de la Hoz, I. Marsa-Maestre, J. M. Gimenez-Guzman, D. Orden y M. Klein, "Multi-Agent Nonlinear Negotiation for Wi-Fi Channel Assignment", en *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, ép. AAMAS '17, São Paulo, Brazil: International Foundation for Autonomous Agents y Multiagent Systems, 2017, págs. 1035-1043.
- [18] E. de la Hoz, J. Gimenez-Guzman, I. Marsa-Maestre y D. Orden, "Automated Negotiation for Resource Assignment in Wireless Surveillance Sensor Networks", *Sensors*, vol. 15, n.º 11, págs. 29 547-29 568, nov. de 2015. DOI: [10.3390/s151129547](https://doi.org/10.3390/s151129547).
- [19] Ó. R. Montero Tovar, "Optimización del número y la localización de los puntos de acceso para redes WIFI en ambientes interiores", Tesis doct.
- [20] P. Pechac, M. Klepal y A. Martinez, "Modeling and optimization of heterogeneous wireless LAN", en *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004*, IEEE, vol. 6, 2004, págs. 4442-4445.
- [21] L. Nagy y A. Farkasvolgyi, "Hierarchic optimization for indoor application", en *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, IEEE, 2009, págs. 2257-2261.
- [22] X. Huang, U. Behr y W. Wiesbeck, "Automatic cell planning for a low-cost and spectrum efficient wireless network", en *Globecom'00-IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No. 00CH37137)*, IEEE, vol. 1, 2000, págs. 276-282.
- [23] L. Nagy y L. Farkas, "Indoor base station location optimization using genetic algorithms", en *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No. 00TH8525)*, IEEE, vol. 2, 2000, págs. 843-846.
- [24] K. Maksuriwong, V. Varavithya y N. Chaiyaratana, "Wireless LAN access point placement using a multi-objective genetic algorithm", en *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483)*, IEEE, vol. 2, 2003, págs. 1944-1949.
- [25] M. Kamenetsky y M. Unbehaun, "Coverage planning for outdoor wireless LAN systems", en *2002 International Zurich Seminar on Broadband Communications Access-Transmission-Networking (Cat. No. 02TH8599)*, IEEE, 2002, págs. 49-49.
- [26] H. R. Anderson y J. P. McGeehan, "Optimizing microcell base station locations using simulated annealing techniques", en *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, IEEE, 1994, págs. 858-862.
- [27] Y. Lee, K. Kim e Y. Choi, "Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs", en *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2002. Proceedings. LCN 2002.*, IEEE, 2002, págs. 831-836.

- [28] R. C. Rodrigues, G. R. Mateus y A. A. F. Loureiro, "Optimal base station placement and fixed channel assignment applied to wireless local area network projects", en *IEEE International Conference on Networks. ICON'99 Proceedings (Cat. No. PR00243)*, IEEE, 1999, págs. 186-192.
- [29] K. I. Aardal, S. P. Van Hoesel, A. M. Koster, C. Mannino y A. Sassano, "Models and solution techniques for frequency assignment problems", *Annals of Operations Research*, vol. 153, n.º 1, págs. 79-129, 2007.
- [30] T. R. Jensen y B. Toft, *Graph coloring problems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [31] Z. Tuza, G. Z. Gutin, M. Plurnmer et al., *Colorings and Related Topics*. 2003.
- [32] E. Malaguti y P. Toth, "A survey on vertex coloring problems", *International transactions in operational research*, vol. 17, n.º 1, págs. 1-34, 2010.
- [33] J. R. Griggs et al., "Graph labellings with variable weights, a survey", *Discrete Applied Mathematics*, vol. 157, n.º 12, págs. 2646-2658, 2009.
- [34] A. Sharp, "Distance coloring", en *European Symposium on Algorithms*, Springer, 2007, págs. 510-521.
- [35] R. B. Myerson y M. A. Satterthwaite, "Efficient mechanisms for bilateral trading", *Journal of economic theory*, vol. 29, n.º 2, págs. 265-281, 1983.
- [36] K. M. Sim y B. Shi, "Concurrent negotiation and coordination for grid resource coallocation", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 40, n.º 3, págs. 753-766, 2009.
- [37] D. De Jonge y C. Sierra, "A multilateral negotiation algorithm for large, non-linear agreement spaces with limited time", *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 29, n.º 5, págs. 896-942, 2015.
- [38] I. Marsa-Maestre, M. A. Lopez-Carmona, J. R. Velasco, T. Ito, M. Klein y K. Fujita, "Balancing utility and deal probability for auction-based negotiations in highly nonlinear utility spaces", en *Twenty-first international joint conference on artificial intelligence*, 2009.
- [39] J. L. Gross y J. Yellen, *Handbook of graph theory*. CRC press, 2003.
- [40] A. Grubshtein y A. Meisels, "A distributed cooperative approach for optimizing a family of network games", en *Intelligent Distributed Computing V*, Springer, 2011, págs. 49-62.
- [41] S. Fatima, S. Kraus y M. Wooldridge, *Principles of automated negotiation*. Cambridge University Press, 2014.
- [42] S. S. Fatima, M. Wooldridge y N. R. Jennings, "Optimal negotiation strategies for agents with incomplete information", en *International workshop on agent theories, architectures, and languages*, Springer, 2001, págs. 377-392.
- [43] I. F. Akyildiz, T. Melodia y K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks", *Computer networks*, vol. 51, n.º 4, págs. 921-960, 2007.
- [44] S. Chiochan, E. Hossain y J. Diamond, "Channel assignment schemes for infrastructure-based 802.11 WLANs: A survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, n.º 1, págs. 124-136, 2010.
- [45] M. Garey y D. Johnson, "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness. San Francisco, 1979", *Google Scholar Google Scholar Digital Library Digital Library*, 1982.
- [46] F.-T. Lin, C.-Y. Kao y C.-C. Hsu, "Applying the genetic approach to simulated annealing in solving some NP-hard problems", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 23, n.º 6, págs. 1752-1767, 1993.

- [47] N. A. Pierce y E. Winfree, "Protein design is NP-hard", *Protein engineering*, vol. 15, n.º 10, págs. 779-782, 2002.
- [48] S. Arora, "Approximation schemes for NP-hard geometric optimization problems: A survey", *Mathematical Programming*, vol. 97, n.º 1, págs. 43-69, 2003.
- [49] C. McDiarmid, "Frequency-distance constraints with large distances", *Discrete Mathematics*, vol. 223, n.º 1-3, págs. 227-251, 2000.
- [50] L. Narayanan y S. M. Shende, "Static frequency assignment in cellular networks", *Algorithmica*, vol. 29, n.º 3, págs. 396-409, 2001.
- [51] A. Mishra, S. Banerjee y W. Arbaugh, "Weighted coloring based channel assignment for WLANs", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 9, n.º 3, págs. 19-31, 2005.
- [52] M. Achanta, *Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points*, US Patent App. 10/959,446, abr. de 2006.
- [53] J. L. A. Revata, "Comparación con grafos de programas de pregrado de estudio en informática del Perú", mar. de 2021. DOI: [10.1590/scielopreprints.1992](https://doi.org/10.1590/scielopreprints.1992).
- [54] H. Bunke, "Graph matching: Theoretical foundations, algorithms, and applications", en *Proc. Vision Interface*, vol. 2000, 2000, págs. 82-88.
- [55] X. Gao, B. Xiao, D. Tao y X. Li, "A survey of graph edit distance", *Pattern Analysis and applications*, vol. 13, n.º 1, págs. 113-129, 2010.
- [56] H. Bunke, "On a relation between graph edit distance and maximum common subgraph", *Pattern recognition letters*, vol. 18, n.º 8, págs. 689-694, 1997.
- [57] H. Bunke, "Error correcting graph matching: On the influence of the underlying cost function", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 21, n.º 9, págs. 917-922, 1999.
- [58] J. R. Ullmann, "An algorithm for subgraph isomorphism", *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 23, n.º 1, págs. 31-42, 1976.
- [59] B. T. Messmer, "Efficient graph matching algorithms", 1995.
- [60] B. T. Messmer y H. Bunke, "A new algorithm for error-tolerant subgraph isomorphism detection", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 20, n.º 5, págs. 493-504, 1998.
- [61] J. J. McGregor, "Backtrack search algorithms and the maximal common subgraph problem", *Software: Practice and Experience*, vol. 12, n.º 1, págs. 23-34, 1982.
- [62] G. Levi, "A note on the derivation of maximal common subgraphs of two directed or undirected graphs", *Calcolo*, vol. 9, n.º 4, págs. 341-352, 1973.
- [63] M. Pelillo, "A unifying framework for relational structure matching", en *Proceedings. Fourteenth International Conference on Pattern Recognition (Cat. No. 98EX170)*, IEEE, vol. 2, 1998, págs. 1316-1319.
- [64] M. A. Eshera y K.-S. Fu, "A graph distance measure for image analysis", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, n.º 3, págs. 398-408, 1984.
- [65] A. Sanfeliu y K.-S. Fu, "A distance measure between attributed relational graphs for pattern recognition", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, n.º 3, págs. 353-362, 1983.
- [66] L. G. Shapiro y R. M. Haralick, "Structural descriptions and inexact matching", *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, n.º 5, págs. 504-519, 1981.
- [67] E. Wong, "Three-dimensional object recognition by attributed graphs", en *Syntactic and Structural Pattern Recognition—Theory and Applications*, World Scientific, 1990, págs. 381-414.

- [68] D. Koutra, A. Parikh, A. Ramdas y J. Xiang, “Algorithms for graph similarity and subgraph matching”, en *Proc. Ecol. inference conf*, vol. 17, 2011.
- [69] S. Melnik, H. Garcia-Molina y E. Rahm, “Similarity flooding: A versatile graph matching algorithm and its application to schema matching”, en *Proceedings 18th international conference on data engineering*, IEEE, 2002, págs. 117-128.
- [70] G. Jeh y J. Widom, “Simrank: a measure of structural-context similarity”, en *Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 2002, págs. 538-543.
- [71] L. A. Zager y G. C. Verghese, “Graph similarity scoring and matching”, *Applied mathematics letters*, vol. 21, n.º 1, págs. 86-94, 2008.
- [72] Y. Tian, R. C. Mceachin, C. Santos, D. J. States y J. M. Patel, “SAGA: a subgraph matching tool for biological graphs”, *Bioinformatics*, vol. 23, n.º 2, págs. 232-239, 2007.
- [73] H. Hu, X. Yan, Y. Huang, J. Han y X. J. Zhou, “Mining coherent dense subgraphs across massive biological networks for functional discovery”, *Bioinformatics*, vol. 21, n.º suppl_1, págs. i213-i221, 2005.
- [74] J. Sun, D. Tao y C. Faloutsos, “Beyond streams and graphs: dynamic tensor analysis”, en *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 2006, págs. 374-383.
- [75] J. Sun, C. Faloutsos, S. Papadimitriou y P. S. Yu, “Graphscope: parameter-free mining of large time-evolving graphs”, en *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 2007, págs. 687-696.
- [76] M. Neuhaus y H. Bunke, “Self-organizing maps for learning the edit costs in graph matching”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 35, n.º 3, págs. 503-514, 2005.
- [77] A. Robles-Kelly y E. R. Hancock, “String edit distance, random walks and graph matching”, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, vol. 18, n.º 03, págs. 315-327, 2004.
- [78] M. Noto y H. Sato, “A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm”, en *Smc 2000 conference proceedings. 2000 ieee international conference on systems, man and cybernetics. cybernetics evolving to systems, humans, organizations, and their complex interactions* (cat. no. 0, IEEE, vol. 3, 2000, págs. 2316-2320.
- [79] M. Neuhaus y H. Bunke, “A probabilistic approach to learning costs for graph edit distance”, en *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.*, IEEE, vol. 3, 2004, págs. 389-393.
- [80] F. Emmert-Streib, M. Dehmer e Y. Shi, “Fifty years of graph matching, network alignment and network comparison”, *Information Sciences*, vol. 346-347, págs. 180-197, jun. de 2016. DOI: [10.1016/j.ins.2016.01.074](https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.074).
- [81] ns-3. dirección: <https://www.nsnam.org> (visitado 04-04-2023).
- [82] V. Iglesias Alcón et al., “Simulación con OMNeT++ de escenarios de reparto de canales en WIFI”, 2016.
- [83] V. H. Muñoz Choez, “Análisis del modelado de redes de sensores inalámbricos mediante la validación de la plataforma de simulación OMNeT.”, 2018.

- [84] D. A. Rivera Polanco et al., “Simulación por eventos discretos de una red WLAN utilizando OMNET++”, 2004.
- [85] *OMNeT++*. dirección: <https://omnetpp.org> (visitado 04-04-2023).
- [86] Á. J. Velasco Suarez, “Diseño de una aplicación académica para el estudio de redes de sensores inalámbricos subacuáticos en Matlab”, B.S. thesis, 2022.
- [87] D. F. Ricaurte Osorio et al., “Herramientas para el dimensionamiento y planeación de una red wifi basado en los parámetros de desempeño”,
- [88] A. Manjón Vázquez, “Estudio y simulación de la tecnología WIFI de acceso inalámbrico”, 2008.
- [89] *MATLAB y Simulink para comunicaciones inalámbricas*. dirección: <https://es.mathworks.com/solutions/wireless-communications.html> (visitado 04-04-2023).
- [90] *WLAN Toolbox*. dirección: <https://es.mathworks.com/products/wlan.html> (visitado 04-04-2023).
- [91] J. A. Bondy, U. S. R. Murty et al., *Graph theory with applications*. Macmillan London, 1976, vol. 290.
- [92] J. Salazar, “Redes inalámbricas”, *Techpedia*. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/81581109.pdf>, 2016.
- [93] *ns-3*. dirección: https://www.nsnam.org/docs/release/3.15/doxygen/structns3_1_1_flow_monitor_1_1_flow_stats.html#a96fdd2ad422c4428fe058b905f4e11dd (visitado 04-01-2023).

Apéndice A

Manual de usuario

A.1 Introducción

En este anexo se explicará cómo se debe llamar a las funciones que se han creado para los dos métodos implementados y para la fase de Calibración; además de las simulaciones para el software “**ns-3**” empleadas en la fase de validación del trabajo propuesto.

A.2 Manual

A.2.1 Llamar al método Discretización del escenario

Para llamar a este método dado que se necesitan datos como la resolución de los grafos y los tamaños de las plantillas de los grafos desarrollados para poder crear las matrices pertinentes, se debe realizar lo siguiente; primero el programa pide las rutas de los grafos, como en este caso va comparando solo por parejas es preciso darle dos rutas, luego pide la resolución a emplear, que se traduce en la división que tendrá el escenario en filas por columnas, en cuyo caso se deben pasar los datos de la siguiente manera: AB,AB donde A pudiera ser cero o uno y B para nuestros casos de estudio siempre fue 2, 3, 4, 6 y 8 con A=0. Siempre aplicamos resoluciones cuadradas en los casos de este trabajo, pero no tiene por qué ser obligatorio, el programa admite que estas comparaciones no tengan que obtener matrices cuadradas. Por último pide los valores máximos de “x” e “y” para los dos grafos, debido a esto se entiende que ambos grafos deben estar en la misma escala para que no existan errores en la contabilización de datos porque pudieran quedarse fuera si una matriz fuese mayor que la otra. Se puede observar lo comentado en la figura 4.6 del Capítulo 4 y en la descripción siguiente.

```
Inserte la direccion de grafo 1: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_0.pk
Inserte la direccion de grafo 2: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_1.pk
Inserte la resolucion (F,C): 04,04
Inserte el rango máximo en x: 140
Inserte el rango máximo en y: 140
```

A.2.2 Llamar al método Radio de Cobertura de APs

En este caso como se utilizan los datos que aportan los grafos en sí, solo es preciso insertar la ruta de estos para que corra el programa, como se observa en las figuras 4.7 y 4.8, se describe a continuación lo comentado.

```
Inserte la direccion de grafo 1: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_0.pk
Inserte la direccion de grafo 2: C:/Users/Outros/Desktop/grafos/grafos/Graphs/nx2/400_1.pk
```

A.2.3 Llamar a Calibración de Resultados

Para correr el script de calibración solo es necesario aportar el índice de la pareja de grafos más similar proporcionadas por ambos métodos. Estos se deben indicar como enteros entre el 1 y el 9 ya que al tener 10 grafos de cada tipo en nuestro conjunto de set se pueden realizar 9 comparaciones fijando uno en específico como punto de comparación. A continuación se observa lo comentado.

```
Inserte el índice de la pareja de grafos escogidas por el método de Discretización: 6
Inserte el índice de la pareja de grafos escogidas por el método de Radio de Coberturas: 3
```

A.2.4 Llamar a Simulación en “ns-3”

En el caso de la simulación con “**ns-3**” se debe llamar al script con el siguiente código:

```
python3 grafos.py -r -s all -c 1 -i 1
```

En este caso **-r** significa run y es la orden para inicializar “**ns-3**”. **-s** significa escenario y se está escogiendo un escenario de los posibles diseñados; existen varias opciones llamadas “channel”, “pos”, “power” y “all”, en función de esto se varían diferentes parámetros en los grafos de la simulación, se escoge “all” ya que esta opción trabaja con los grafos del set objeto de estudio del TFM y genera un vector donde guarda la configuración para varias simulaciones por cada grafo, estas como se ha comentado a lo largo del trabajo hacen variar los canales de operación de los 26 APs de cada grafo, con un total de 103 variaciones diferentes. **-c** significa cores y es para si se requiere realizar tareas en paralelo utilizando la capacidad de procesamiento de múltiples CPU, en este caso lo ponemos a 1. El parámetro **-i** son las iteraciones que se desean que haga el programa sobre cada una de las simulaciones, como son 103 simulaciones diferentes y 10 grafos a simular de cada tipo esto ya conlleva un tiempo determinado de procesamiento y un gasto de recursos computacionales elevado, por lo que se decide dejar el valor en 1, es necesario añadir que para ganar mayor diversidad en los resultados y lograr datos lo más parecidos a la realidad se pudieran realizar más iteraciones.

Apéndice B

Tablas de resultados

B.1 Tablas de resultados de los métodos empleados

B.1.1 Discretización del escenario

Se muestran las Tablas de resultados calculados para la técnica de discretización del escenario aplicada a los conjuntos de grafos “400” y “600”.

Tabla B.1: Comparación de escenarios mediante su discretización.

Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_1					
Grid	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
2 x 2	18	3; 0.75	4.5	4	2.1794
3 x 3	72	6; 0.666	8	0	7.6883
4 x 4	94	11; 0.6875	5.875	3	3.9823
6 x 6	154	21; 0.5833	4.277	1	2.8539
8 x 8	190	21; 0.3281	2.96875	1	2.3911
16 x 16	334	19; 0.07	1.3046	0	1.2873
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_2					
2 x 2	45	4; 1	11.25	4	6.2998
3 x 3	59	5; 0.555	6.555	2	5.0356
4 x 4	79	8; 0.5	4.9375	2	3.9126
6 x 6	105	10; 0.277	2.9166	3	2.5426
8 x 8	175	22; 0.3437	2.7343	1	2.2096
16 x 16	337	15; 0.058	1.3164	1	1.2301
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_3					
2 x 2	10	1; 0.25	2.5	1	1.1180
3 x 3	62	7; 0.777	6.888	4	4.7479
4 x 4	64	6; 0.375	4	3	3.6055
6 x 6	142	16; 0.444	3.944	1	2.7783
8 x 8	178	20; 0.3125	2.78125	2	2.0876
16 x 16	336	18; 0.07	1.3125	1	1.2577
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_4					
2 x 2	53	4; 1	13.25	10	2.5860
3 x 3	87	8; 0.888	9.666	6	6.4978
4 x 4	97	11; 0.6875	6.0625	5	4.0073
6 x 6	153	16; 0.25	4.25	2	3.3778
8 x 8	177	20; 0.3125	2.7656	1	2.6025
16 x 16	329	17; 0.066	1.2851	1	1.3290
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_5					
2 x 2	28	3; 0.75	7	3	3.1622
3 x 3	50	5; 0.555	5.555	3	4.0030
4 x 4	64	4; 0.25	4	1	3.9843
6 x 6	112	12; 0.333	3.11	1	2.5030
8 x 8	172	19; 0.2968	2.6875	1	2.2351
16 x 16	322	12; 0.046	1.2578	0	1.2294
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_6					
2 x 2	42	3; 0.75	10.5	1	6.9462
3 x 3	38	5; 0.555	4.22	3	2.0427
4 x 4	80	8; 0.5	5	2	3.9528
6 x 6	136	17; 0.4722	3.777	2	2.3700
8 x 8	162	17; 0.2656	2.53	0	2.2497
16 x 16	342	15; 0.058	1.3359	1	1.2733
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_7					
2 x 2	40	3; 0.75	10	3	5.7008
3 x 3	42	5; 0.555	4.666	2	3.2317
4 x 4	86	10; 0.625	5.375	0	4.5944
6 x 6	118	14; 0.388	3.277	1	2.2559
8 x 8	192	20; 0.3125	3	2	2.0841
16 x 16	332	19; 0.07	1.2968	1	1.3011

Tabla B.2: Comparación de escenarios mediante su discretización.

Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_1					
Grid	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_8					
2 x 2	53	4; 1	13.25	9	3.4910
3 x 3	71	7; 0.777	7.888	10	4.3061
4 x 4	85	11; 0.6875	5.3125	4	3.9325
6 x 6	125	16; 0.444	3.472	1	2.5439
8 x 8	167	17; 0.2656	2.609	3	1.9970
16 x 16	345	17; 0.066	1.3476	0	1.2870
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_9					
2 x 2	44	4; 1	11	7	4.0620
3 x 3	48	4; 0.444	5.333	1	5.944
4 x 4	74	8; 0.5	4.625	3	3.0181
6 x 6	136	14; 0.388	3.777	2	2.9449
8 x 8	194	24; 0.375	3.03125	1	2.1357
16 x 16	352	16; 0.06	1.375	0	1.2531

Tabla B.3: Comparación de escenarios mediante su discretización.

Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_1					
Grid	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
2 x 2	18	2; 0.5	4.5	4	3.2015
3 x 3	66	5; 0.55	7.33	0	7.0553
4 x 4	90	8; 0.5	5.625	1	5.4757
6 x 6	182	25; 0.69	5.055	2	3.3988
8 x 8	222	29; 0.45	3.468	1	2.8171
16 x 16	390	34; 0.13	1.523	0	1.5307
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_2					
2 x 2	31	4; 1	7.75	7	2.5860
3 x 3	65	6; 0.66	7.22	0	5.6524
4 x 4	89	11; 0.68	5.5625	4	3.6737
6 x 6	151	18; 0.5	4.19	2	3.2473
8 x 8	229	29; 0.45	3.578	1	2.6089
16 x 16	407	29; 0.11	1.589	0	1.4278
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_3					
2 x 2	34	4; 1	8.5	8	2.1794
3 x 3	94	6; 0.66	10.44	3	7.1041
4 x 4	110	11; 0.68	6.875	7	4.8460
6 x 6	198	22; 0.61	5.5	3	3.7155
8 x 8	212	25; 0.39	3.3125	1	2.9361
16 x 16	436	34; 0.13	1.703	0	1.6740
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_4					
2 x 2	64	3; 0.75	16	1	10.6301
3 x 3	84	6; 0.66	9.33	1	5.9628
4 x 4	140	13; 0.81	8.75	1	5.2737
6 x 6	188	22; 0.61	5.22	7	3.62944
8 x 8	244	27; 0.39	3.8125	2	3.1616
16 x 16	424	29; 0.11	1.656	0	1.5684
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_5					
2 x 2	49	3; 0.75	12.25	0	9.2297
3 x 3	79	7; 0.77	8.77	8	4.7790
4 x 4	105	11; 0.68	6.5625	1	4.5134
6 x 6	191	22; 0.61	5.30	1	3.8356
8 x 8	227	27; 0.41	3.546	1	2.5552
16 x 16	419	29; 0.11	1.636	0	1.5196
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_6					
2 x 2	41	3; 0.75	10.25	2	6.9776
3 x 3	73	6; 0.66	8.11	1	6.0999
4 x 4	91	10; 0.62	5.6875	4	4.9335
6 x 6	165	20; 0.55	4.58	1	3.6314
8 x 8	235	23; 0.36	3.67	1	3.0054
16 x 16	415	35; 0.13	1.621	0	1.6819
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_7					
2 x 2	33	4; 1	8.25	6	1.4790
3 x 3	65	6; 0.66	7.22	1	7.1301
4 x 4	117	10; 0.62	7.3125	2	5.3702
6 x 6	195	22; 0.61	5.416	6	3.5852
8 x 8	235	25; 0.39	3.67	2	3.6101
16 x 16	415	32; 0.12	1.621	1	1.6396

Tabla B.4: Comparación de escenarios mediante su discretización.

Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_1					
Grid	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_8					
2 x 2	51	3; 0.75	12.75	3	8.0738
3 x 3	59	6; 0.66	6.55	4	5.2938
4 x 4	127	11; 0.68	7.9375	2	6.1488
6 x 6	169	20; 0.55	4.69	2	3.1782
8 x 8	245	27; 0.42	3.828	3	2.8425
16 x 16	425	37; 0.14	1.66	0	1.5902
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_9					
2 x 2	25	2; 0.5	6.25	2	3.6314
3 x 3	57	6; 0.66	6.33	10	3.9157
4 x 4	131	11; 0.68	8.1875	2	5.3176
6 x 6	169	22; 0.61	4.69	2	2.9327
8 x 8	229	23; 0.35	3.578	2	2.9144
16 x 16	425	28; 0.10	1.66	0	1.5044

B.1.2 Radio de Coberturas

Se muestran las Tablas de resultados calculados para la técnica de Clasificación por radio de coberturas aplicada a los conjuntos de grafos “400” y “600”.

Tabla B.5: Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.

Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_1					
Radio de Cobertura (m)	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
hasta 5	41	21	1.5769	2	1.0803
entre 5 y 10	79	24	3.0384	2	1.9111
entre 10 y 15	86	22	3.30769	1	2.6277
entre 15 y 20	109	25	4.1923	3	2.5422
entre 20 y 25	88	22	3.38461	1	2.6029
entre 25 y 30	102	26	3.9230	1	2.5407
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_2					
hasta 5	44	23	1.6923	1	1.3803
entre 5 y 10	66	22	2.5384	1	2.0981
entre 10 y 15	76	22	2.9230	1	2.7021
entre 15 y 20	87	22	3.34615	1	3.0247
entre 20 y 25	97	22	3.73077	3	2.5047
entre 25 y 30	120	23	4.6153	2	3.8836
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_3					
hasta 5	29	19	1.1153	1	0.9334
entre 5 y 10	59	22	2.26923	1	1.9524
entre 10 y 15	79	24	3.03846	1	2.5035
entre 15 y 20	96	26	3.6923	1	2.6423
entre 20 y 25	93	25	3.5769	3	2.5596
entre 25 y 30	123	23	4.7307	3	3.6538
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_4					
hasta 5	33	19	1.2692	1	1.2575
entre 5 y 10	74	23	2.8461	1	2.1607
entre 10 y 15	100	24	3.8461	3	2.7272
entre 15 y 20	73	22	2.8077	2	2.5573
entre 20 y 25	103	25	3.9615	1	2.9804
entre 25 y 30	86	25	3.30769	1	2.9582
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_5					
hasta 5	33	21	1.2692	1	1.0582
entre 5 y 10	61	20	2.3461	0	2.2003
entre 10 y 15	77	22	2.9615	1	2.5340
entre 15 y 20	61	20	2.34615	3	1.9403
entre 20 y 25	117	24	4.5	4	3.3883
entre 25 y 30	119	25	4.5769	1	3.9338
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_6					
hasta 5	35	22	1.3461	1	0.9977
entre 5 y 10	66	25	2.5384	1	1.8652
entre 10 y 15	54	21	2.0769	1	1.7303
entre 15 y 20	99	25	3.8076	2	2.4497
entre 20 y 25	69	25	2.6538	1	1.7084
entre 25 y 30	133	26	5.1153	4	2.9655
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_7					
hasta 5	37	18	1.4230	1	1.5234
entre 5 y 10	58	23	2.23077	1	1.7608
entre 10 y 15	99	23	3.8077	4	2.3041
entre 15 y 20	91	24	3.5	5	2.5757
entre 20 y 25	87	22	3.3461	1	2.8547
entre 25 y 30	92	23	3.5384	2	3.1406

Tabla B.6: Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.

Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_8					
Radio de Cobertura (m)	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
hasta 5	29	16	1.1153	0	1.0497
entre 5 y 10	80	26	3.0769	1	1.8795
entre 10 y 15	82	24	3.1538	3	2.1784
entre 15 y 20	88	23	3.3846	2	2.6176
entre 20 y 25	108	23	4.1538	1	2.9960
entre 25 y 30	133	25	5.1153	1	3.9255
Grafo de Referencia: 396 usuarios y 26 APs 400_0 con 400_9					
hasta 5	41	19	1.5769	2	1.2762
entre 5 y 10	70	22	2.6923	1	2.6713
entre 10 y 15	85	24	3.2692	4	2.5200
entre 15 y 20	76	24	2.9230	3	2.1108
entre 20 y 25	96	24	3.6923	1	2.7563
entre 25 y 30	124	23	4.7692	3	4.0221

Tabla B.7: Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.

Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_1					
Radio de Cobertura (m)	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
hasta 5	31	17	1.1923	0	1.2409
entre 5 y 10	81	25	3.1153	4	1.5769
entre 10 y 15	87	23	3.3461	1	2.6009
entre 15 y 20	109	25	4.1923	3	2.9873
entre 20 y 25	123	24	4.7307	2	3.5143
entre 25 y 30	145	20	5.5769	0	5.4784
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_2					
hasta 5	54	22	2.0769	2	1.4655
entre 5 y 10	66	22	2.5384	1	2.1164
entre 10 y 15	93	24	3.5769	1	2.8979
entre 15 y 20	100	24	3.8461	1	2.7553
entre 20 y 25	132	25	5.0769	2	3.7202
entre 25 y 30	156	25	6.0	8	3.7210
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_3					
hasta 5	40	20	1.5384	1	1.2162
entre 5 y 10	77	22	2.9615	2	2.2271
entre 10 y 15	87	23	3.3461	1	2.8815
entre 15 y 20	131	23	5.0384	2	4.4590
entre 20 y 25	125	24	4.8076	1	3.6376
entre 25 y 30	157	26	6.0384	5	3.3337
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_4					
hasta 5	48	20	1.8461	1	1.7692
entre 5 y 10	63	20	2.4230	0	2.1334
entre 10 y 15	88	23	3.0384	1	2.7467
entre 15 y 20	104	23	4.0	2	3.0127
entre 20 y 25	146	25	5.6153	3	4.0199
entre 25 y 30	109	24	4.1923	2	2.8557
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_5					
hasta 5	44	21	1.6923	1	1.2639
entre 5 y 10	70	22	2.6923	1	2.2662
entre 10 y 15	100	20	3.8461	0	3.7384
entre 15 y 20	105	22	4.0384	5	3.1559
entre 20 y 25	141	23	5.4230	3	4.3160
entre 25 y 30	148	23	5.6923	9	4.5044
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_6					
hasta 5	38	19	1.4615	1	1.5249
entre 5 y 10	55	24	2.1153	1	1.4230
entre 10 y 15	112	24	4.3076	2	3.4168
entre 15 y 20	117	25	4.5	3	3.0287
entre 20 y 25	134	25	5.1538	3	3.3819
entre 25 y 30	94	24	4.03.6153	1	2.8158
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_7					
hasta 5	46	20	1.7692	1	1.6940
entre 5 y 10	75	22	2.8846	3	2.7502
entre 10 y 15	102	24	3.9230	2	2.6446
entre 15 y 20	103	23	3.9615	1	3.4583
entre 20 y 25	118	23	4.5384	3	3.4107
entre 25 y 30	120	24	4.6153	2	3.4314

Tabla B.8: Tabla de comparación de escenarios mediante los radios de cobertura de los APs.

Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_8					
Radio de Cobertura (m)	Absoluto	Normalizado	Media	Moda	Desviación típica σ
hasta 5	42	21	1.6153	1	1.1792
entre 5 y 10	74	22	2.8461	3	2.0132
entre 10 y 15	114	21	4.3846	0	3.6698
entre 15 y 20	146	26	5.6153	7	3.1018
entre 20 y 25	119	23	4.5769	1	4.2169
entre 25 y 30	104	24	4.0	5	2.8554
Grafo de Referencia: 590 usuarios y 26 APs 600_0 con 600_9					
hasta 5	36	21	1.3846	1	1.1461
entre 5 y 10	55	21	2.1153	1	1.6944
entre 10 y 15	110	25	4.2307	1	2.9911
entre 15 y 20	114	25	4.3846	1	3.0518
entre 20 y 25	110	24	4.2307	4	2.8864
entre 25 y 30	130	25	5.0	2	3.2462

B.1.3 Validaciones

B.1.3.1 Throughput

Tabla B.9: Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.

Sim	Throughput 400_0 (Kbps)	Throughput 400_5 (Kbps)	Diferencia Throughput (Kbps)	Diferencia Normalizada
1	15.912720	15.912721	7.575757e-7	4.760818e-05
2	15.912720	15.912721	7.575757e-7	4.760818e-05
3	15.912720	15.912721	7.575757e-7	4.760818e-05
4	15.912726	15.912727	7.575757e-7	4.7608168e-05
5	15.912728	15.912727	2.525252e-7	1.586938e-05
6	15.91272	15.912728	1.515151e-7	9.521633e-05
7	15.912728	15.912728	5.050505e-7	3.173877e-05
8	15.912728	15.912727	1.262626e-06	7.934693e-05
9	15.912726	15.912727	1.262626e-06	7.934694e-05
10	15.912729	15.912726	2.525252e-06	1.586938e-04
11	15.912727	15.912727	5.050505e-7	3.173877e-05
12	15.912728	15.912726	1.767676e-06	1.110857e-04
13	15.912726	15.912727	1.515151e-06	9.521633e-05
14	15.912727	15.912728	1.010101e-06	6.347755e-05
15	15.912727	15.912726	1.767676e-06	1.110857e-04
16	15.912727	15.912726	1.010101e-06	6.347755e-05
17	15.912727	15.912729	1.515151e-06	9.521632e-05
18	15.912726	15.912726	2.525252e-7	1.586938e-05
19	15.912727	15.912727	7.575757e-7	4.760816e-05
20	15.912727	15.912728	1.767676e-06	1.1108570e-04
21	15.912727	15.912727	5.050505e-7	3.173877e-05
22	15.912727	15.912726	1.767676e-06	1.110857e-04
23	15.912728	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
24	15.912728	15.912727	7.575757e-7	4.760816e-05
25	15.912726	15.912728	1.515151e-06	9.521633e-05
26	15.912727	15.9127275	2.525252e-7	1.586938e-05
27	15.912727	15.912727	2.525252e-7	1.586938e-05
28	15.912726	15.912726	5.050505e-7	3.173877e-05
29	15.912728	15.912728	5.050505e-7	3.173877e-05
30	15.912727	15.912728	1.010101e-06	6.347755e-05
31	15.912728	15.912726	1.767676e-06	1.110857e-04
32	15.912726	15.912725	7.575757e-7	4.760816e-05
33	15.912727	15.912726	1.262626e-06	7.934694e-05
34	15.912727	15.912727	5.050505e-7	3.173877e-05
35	15.912726	15.912727	1.010101e-07	6.347755e-05
36	15.912727	15.912727	0.0	0.0
37	15.912728	15.912726	2.272727e-06	1.428244e-04
38	15.912727	15.912728	7.575757e-7	4.760816e-05
39	15.912728	15.912727	1.262626e-06	7.934693e-05
40	15.912729	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
41	15.912727	15.912728	7.575757e-7	4.760816e-05
42	15.912728	15.912728	5.050505e-7	3.173877e-05
43	15.912728	15.912727	2.525252e-7	1.586938e-05
44	15.912726	15.912727	1.515151e-06	9.521633e-05
45	15.912728	15.912727	1.767676e-06	1.110857e-04
46	15.912727	15.912726	1.010101e-06	6.347755e-05
47	15.912727	15.912727	2.525252e-7	1.586938e-05
48	15.912728	15.912726	1.515151e-06	9.521632e-05
49	15.912727	15.912727	2.525252e-7	1.586938e-05
50	15.912727	15.912728	1.515151e-06	9.521633e-05
51	15.912728	15.912727	7.575757e-7	4.760816e-05
52	15.912728	15.912727	1.515151e-06	9.521632e-05
53	15.912727	15.912726	1.262626e-06	7.934694e-05
54	15.912729	15.912730	5.050505e-7	3.173877e-05

Tabla B.10: Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.

Sim	Throughput 400_0 (Kbps)	Throughput 400_5 (Kbps)	Diferencia Throughput (Kbps)	Diferencia Normalizada
55	15.912729	15.912730	5.050505e-7	3.173877e-05
56	15.912729	15.912729	0.0	0.0
57	15.912729	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
58	15.912730	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
59	15.912730	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
60	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
61	15.912730	15.912730	0.0	0.0
62	15.912728	15.912730	1.515151e-06	9.521632e-05
63	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
64	15.912730	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
65	15.912730	15.912730	2.525252e-7	1.586938e-05
66	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
67	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
68	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
69	15.912730	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
70	15.912730	15.912730	5.050505e-7	3.173877e-05
71	15.912729	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
72	15.912729	15.912729	0.0	0.0
73	15.912730	15.912729	1.010101e-06	6.347753e-05
74	15.912729	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
75	15.912729	15.912729	0.0	0.0
76	15.912729	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
77	15.912729	15.912729	0.0	0.0
78	15.912729	15.912730	1.010101e-06	6.347754e-05
79	15.912729	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
80	15.912728	15.912729	1.262626e-06	7.934693e-05
81	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
82	15.912730	15.912730	5.050505e-7	3.173877e-05
83	15.912730	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
84	15.912729	15.912730	7.575757e-7	4.760815e-05
85	15.912729	15.912730	5.050505e-7	3.173877e-05
86	15.912729	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
87	15.912729	15.912730	1.010101e-06	6.347754e-05
88	15.912730	15.912729	1.010101e-06	6.347754e-05
89	15.912729	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
90	15.912730	15.912730	0.0	0.0
91	15.912728	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
92	15.912729	15.912728	1.010101e-06	6.347754e-05
93	15.912730	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
94	15.912729	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05
95	15.912729	15.912729	7.575757e-7	4.760816e-05
96	15.912729	15.912730	2.525252e-7	1.586938e-05
97	15.912729	15.912729	0.0	0.0
98	15.912729	15.912729	7.575757e-7	4.760816e-05
99	15.912729	15.912730	2.525252e-7	1.586938e-05
100	15.912729	15.912729	2.525252e-7	1.586938e-05
101	15.912729	15.912730	1.010101e-06	6.347754e-05
102	15.912729	15.912729	0.0	0.0
103	15.912730	15.912729	5.050505e-7	3.173877e-05

Tabla B.11: Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.

Sim	Throughput 600_0 (Kbps)	Throughput 600_1 (Kbps)	Diferencia Throughput (Kbps)	Diferencia Normalizada
1	15.907464	15.913738	6.274072e-03	0.394410
2	15.907464	15.913738	6.274072e-03	0.394410
3	15.907464	15.913738	6.274072e-03	0.394410
4	15.907477	15.913752	6.274796e-03	0.394455
5	15.907478	15.913751	6.273779e-03	0.394391
6	15.907477	15.913752	6.274626e-03	0.394445
7	15.907475	15.913752	6.277336e-03	0.394615
8	15.907475	15.913752	6.276318e-03	0.394551
9	15.907476	15.913752	6.276659e-03	0.394572
10	15.907477	15.913752	6.275305e-03	0.394487
11	15.907477	15.913752	6.275305e-03	0.394487
12	15.907476	15.913750	6.274453e-03	0.394434
13	15.907475	15.913752	6.276997e-03	0.394594
14	15.907476	15.913751	6.275300e-03	0.394487
15	15.90747	15.913751	6.275638e-03	0.394508
16	15.907479	15.913752	6.273783e-03	0.394392
17	15.907477	15.913753	6.275814e-03	0.394519
18	15.90747	15.913751	6.274116e-03	0.394413
19	15.907477	15.913752	6.275136e-03	0.394477
20	15.907477	15.913752	6.275304e-03	0.394487
21	15.907478	15.913750	6.272082e-03	0.394285
22	15.907476	15.913752	6.27547e-03	0.394498
23	15.907476	15.913751	6.275132e-03	0.394476
24	15.907477	15.913753	6.275645e-03	0.394509
25	15.907475	15.913752	6.276997e-03	0.394594
26	15.907474	15.913752	6.278182e-03	0.394668
27	15.907476	15.913753	6.2766609e-03	0.394573
28	15.90747	15.913752	6.276488e-03	0.394562
29	15.907476	15.913752	6.275813e-03	0.394519
30	15.907475	15.913752	6.276826e-03	0.394583
31	15.907477	15.913753	6.275645e-03	0.394509
32	15.907477	15.913750	6.2734380e-03	0.394370
33	15.907478	15.913751	6.273271e-03	0.394359
34	15.907476	15.913752	6.275473e-03	0.394498
35	15.907477	15.913753	6.275475e-03	0.394498
36	15.907476	15.913748	6.272415e-03	0.394306
37	15.907477	15.913751	6.273439e-03	0.394370
38	15.907476	15.913752	6.276321e-03	0.394551
39	15.907476	15.913751	6.274793e-03	0.394455
40	15.907477	15.913753	6.275815e-03	0.394519
41	15.907475	15.913752	6.276658e-03	0.394572
42	15.907475	15.913751	6.276147e-03	0.394540
43	15.907477	15.913752	6.275306e-03	0.394487
44	15.907478	15.913753	6.274799e-03	0.394455
45	15.907477	15.913751	6.274795e-03	0.394455
46	15.907478	15.913751	6.272761e-03	0.490371
47	15.907476	15.913751	6.275302e-03	0.394487
48	15.907477	15.913752	6.275134e-03	0.394477
49	15.907477	15.913752	6.274626e-03	0.394445
50	15.907476	15.913753	6.276492e-03	0.394562
51	15.907476	15.913751	6.274964e-03	0.394466
52	15.907474	15.913751	6.276824e-03	0.394583
53	15.907476	15.913751	6.275471e-03	0.394498
54	15.907479	15.913755	6.275143e-03	0.394477

Tabla B.12: Tabla de comparación Throughput de escenarios parecidos.

Sim	Throughput 600_0 (Kbps)	Throughput 600_1 (Kbps)	Diferencia Throughput (Kbps)	Diferencia Normalizada
55	15.907479	15.913755	6.275820e-03	0.394520
56	15.907480	15.913755	6.274637e-03	0.394445
57	15.907480	15.913755	6.275145e-03	0.394477
58	15.907480	15.913755	6.274974e-03	0.394466
59	15.907480	15.913754	6.273618e-03	0.394381
60	15.907480	15.913755	6.274975e-03	0.394466
61	15.907480	15.913755	6.275823e-03	0.394520
62	15.907480	15.913755	6.274976e-03	0.394467
63	15.907478	15.913756	6.277516e-03	0.394626
64	15.907480	15.913756	6.275316e-03	0.394488
65	15.907481	15.913755	6.274299e-03	0.394424
66	15.907480	15.913754	6.274296e-03	0.394424
67	15.907480	15.913755	6.275483e-03	0.394498
68	15.907480	15.913755	6.274805e-03	0.394456
69	15.907479	15.913754	6.274973e-03	0.394466
70	15.907479	15.913755	6.275313e-03	0.394488
71	15.907479	15.913754	6.275143e-03	0.394477
72	15.907480	15.913755	6.275314e-03	0.394488
73	15.907480	15.913754	6.274465e-03	0.394434
74	15.907480	15.913755	6.274975e-03	0.394466
75	15.907479	15.913755	6.275822e-03	0.394520
76	15.907480	15.913755	6.274636e-03	0.394445
77	15.907479	15.913756	6.276162e-03	0.394541
78	15.907480	15.913755	6.275314e-03	0.394488
79	15.907480	15.913755	6.274806e-03	0.394456
80	15.907478	15.913755	6.276667e-03	0.394573
81	15.907479	15.913755	6.276331e-03	0.394552
82	15.907480	15.913755	6.274468e-03	0.394435
83	15.907479	15.913755	6.275990e-03	0.394530
84	15.907479	15.913755	6.275483e-03	0.394498
85	15.907479	15.913755	6.275991e-03	0.394530
86	15.907480	15.913756	6.275993e-03	0.394530
87	15.907479	15.913754	6.274294e-03	0.394424
88	15.907479	15.913755	6.275822e-03	0.394520
89	15.907480	15.913754	6.274635e-03	0.394445
90	15.907480	15.913755	6.275823e-03	0.394520
91	15.907479	15.913754	6.274972e-03	0.394466
92	15.907480	15.913755	6.275483e-03	0.394498
93	15.907480	15.913755	6.275314e-03	0.394488
94	15.907479	15.913755	6.276331e-03	0.394552
95	15.907479	15.913753	6.274293e-03	0.394424
96	15.907479	15.913754	6.275312e-03	0.394488
97	15.907480	15.913755	6.275314e-03	0.394488
98	15.907480	15.913755	6.274467e-03	0.394435
99	15.907480	15.913755	6.275823e-03	0.394520
100	15.907479	15.913754	6.274294e-03	0.394424
101	15.907480	15.913754	6.274465e-03	0.394434
102	15.907480	15.913755	6.274975e-03	0.394466
103	15.907480	15.913755	6.274467e-03	0.394434

B.1.3.2 Delay

Tabla B.13: Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.

Sim	Delay 400_0 (seg)	Delay 400_5 (seg)	Diferencia Delay (seg)	Diferencia Normalizada
1	0.0003027	0.00030344	6.6381818e-07	0.0021923
2	0.00030278	0.0003034	6.6381818e-07	0.0021923
3	0.0003027	0.0003034	6.6381818e-07	0.002192
4	0.0002541	0.0002500	4.0821616e-06	0.0160608
5	0.0002519	0.0002485	3.4305252e-06	0.0136136
6	0.000254	0.0002517	3.1840808e-06	0.0124912
7	0.0002498	0.0002505	6.0552272e-07	0.0024230
8	0.0002528	0.0002549	2.1649090e-06	0.0085627
9	0.0002591	0.0002529	6.1590025e-06	0.0237657
10	0.0002516	0.0002599	8.3290227e-06	0.0331014
11	0.0002502	0.0002532	2.9745606e-06	0.01188580
12	0.0002523	0.0002505	1.8306893e-06	0.0072539
13	0.0002507	0.0002557	4.9881161e-06	0.019890
14	0.0002565	0.0002509	5.6283888e-06	0.0219367
15	0.0002535	0.0002542	7.2068181e-07	0.0028427
16	0.0002521	0.0002509	1.2071010e-06	0.0047879
17	0.0002511	0.0002485	2.6248484e-06	0.0104506
18	0.0002572	0.0002535	3.6968636e-06	0.0143714
19	0.0002518	0.0002494	2.3670176e-06	0.0093998
20	0.0002511	0.0002524	1.2837803e-06	0.0051117
21	0.0002523	0.0002520	3.142878e-07	0.0012452
22	0.0002538	0.0002528	9.9019949e-07	0.0039002
23	0.0002491	0.0002506	1.4396111e-06	0.0057769
24	0.0002531	0.0002514	1.7289924e-06	0.0068291
25	0.0002525	0.0002501	2.4031287e-06	0.00951650
26	0.0002536	0.0002516	2.0079217e-06	0.0079168
27	0.0002520	0.0002614	9.4095681e-06	0.0373347
28	0.0002514	0.0002528	1.3836111e-06	0.0055023
29	0.0002518	0.0002499	1.8285202e-06	0.0072615
30	0.0002551	0.0002511	4.0055227e-06	0.0156991
31	0.0002520	0.0002558	3.8426010e-06	0.0152473
32	0.0002548	0.0002581	3.3214116e-06	0.0130316
33	0.0002509	0.0002571	6.1910227e-06	0.0246724
34	0.0002542	0.0002519	2.3352121e-06	0.0091836
35	0.0002524	0.0002491	3.3492323e-06	0.0132648
36	0.0002521	0.0002546	2.5050732e-06	0.0099345
37	0.0002501	0.0002526	2.4398939e-06	0.009752
38	0.0002537	0.0002528	1.6764393e-06	0.0066056
39	0.0002509	0.0002524	1.4362095e-06	0.0057222
40	0.0002538	0.0002515	2.3561111e-06	0.0092803
41	0.0002549	0.0002554	5.4938636e-07	0.0021551
42	0.0002540	0.0002539	9.601010e-08	0.0003778
43	0.0002510	0.0002565	5.4991439e-06	0.0219029
44	0.0002514	0.0002512	1.6201767e-07	0.0006444
45	0.0002508	0.0002502	5.9076010e-07	0.0023553
46	0.0002531	0.0002498	3.3691489e-06	0.0133075
47	0.0002520	0.0002527	7.1796969e-07	0.0028481
48	0.0002510	0.0002628	1.1792977e-05	0.0469698
49	0.0002560	0.0002544	1.6264267e-06	0.0063519
50	0.0002536	0.0002545	9.4435606e-07	0.0037237
51	0.0002492	0.0002513	2.1194141e-06	0.0085031
52	0.0002499	0.0002522	2.3589848e-06	0.0094385
53	0.0002507	0.0002496	1.0931565e-06	0.0043588
54	0.0002423	0.0002404	1.9083080e-06	0.0078737

Tabla B.14: Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.

Sim	Delay 400_0 (seg)	Delay 400_5 (seg)	Diferencia Delay (seg)	Diferencia Normalizada
55	0.0002391	0.0002390	3.1252525e-08	0.0001307
56	0.0002376	0.0002404	2.8235252e-06	0.0118834
57	0.0002405	0.000240	3.5816414e-07	0.0014886
58	0.0002385	0.0002385	6.9654040e-08	0.0002919
59	0.0002383	0.0002369	1.3434343e-06	0.0056371
60	0.0002411	0.0002368	4.2841010e-06	0.0177633
61	0.0002401	0.0002396	4.3155555e-07	0.0017972
62	0.0002377	0.0002373	3.0622979e-07	0.0012882
63	0.0002422	0.0002393	2.8726792e-06	0.0118599
64	0.0002381	0.0002378	3.2786111e-07	0.0013767
65	0.0002386	0.0002384	2.6897727e-07	0.0011268
66	0.0002407	0.0002384	2.3384772e-06	0.0097135
67	0.0002385	0.0002389	3.7405808e-07	0.0015680
68	0.0002399	0.0002393	6.0971212e-07	0.002540
69	0.0002387	0.0002397	1.0001414e-06	0.0041890
70	0.0002391	0.0002384	6.9569191e-07	0.0029091
71	0.0002407	0.0002397	1.0021616e-06	0.0041626
72	0.0002392	0.0002382	9.9033585e-07	0.0041388
73	0.0002389	0.0002376	1.3141186e-06	0.0055000
74	0.0002397	0.0002386	1.0977979e-06	0.0045789
75	0.0002394	0.0002423	2.906497e-06	0.0121405
76	0.0002405	0.0002394	1.1167499e-06	0.0046417
77	0.0002415	0.0002382	3.2383510e-06	0.0134084
78	0.0002402	0.0002383	1.8798939e-06	0.0078246
79	0.0002369	0.0002386	1.6492500e-06	0.0069594
80	0.0002434	0.0002389	4.4349621e-06	0.0182198
81	0.0002389	0.0002382	7.5513383e-07	0.0031597
82	0.0002383	0.0002398	1.5771515e-06	0.0066177
83	0.0002399	0.0002369	2.9408383e-06	0.01225782
84	0.0002405	0.0002372	3.2934090e-06	0.0136900
85	0.0002396	0.0002387	9.1686868e-07	0.0038251
86	0.0002393	0.0002395	1.7152777e-07	0.0007165
87	0.0002414	0.0002366	4.7517755e-06	0.0196802
88	0.0002389	0.0002403	1.4155176e-06	0.0059237
89	0.0002388	0.0002377	1.0090454e-06	0.0042254
90	0.0002395	0.0002380	1.5088308e-06	0.0062987
91	0.00024099	0.0002390	1.8990606e-06	0.0078801
92	0.0002376	0.00024420	6.5439217e-06	0.0275351
93	0.0002399	0.0002388	1.1131262e-06	0.0046390
94	0.0002401	0.0002372	2.8730959e-06	0.0119652
95	0.0002402	0.0002394	7.7539898e-07	0.0032276
96	0.0002395	0.0002377	1.7681136e-06	0.0073823
97	0.0002390	0.0002404	1.4025252e-06	0.0058670
98	0.0002395	0.0002400	4.562121e-07	0.0019043
99	0.0002384	0.0002402	1.8355126e-06	0.0076988
100	0.0002390	0.0002391	1.6811868e-07	0.0007034
101	0.0002380	0.0002358	2.1220984e-06	0.0089162
102	0.0002384	0.0002398	1.3916717e-06	0.0058369
103	0.0002383	0.0002394	1.0442878e-06	0.0043804

Tabla B.15: Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.

Sim	Delay 600_0 (seg)	Delay 600_1 (seg)	Diferencia Delay (seg)	Diferencia Normalizada
1	0.0003536	0.0003484	5.170036e-06	0.0146186
2	0.0003536	0.0003484	5.1700368e-06	0.0146186
3	0.0003536	0.0003484	5.1700368e-06	0.0146186
4	0.0002641	0.0002582	5.92288924e-06	0.0224246
5	0.0002585	0.00025916	6.1003018e-07	0.0023593
6	0.0002617	0.0002604	1.3171488e-06	0.0050322
7	0.0002580	0.0002567	1.2599829e-06	0.0048833
8	0.0002625	0.0002590	3.4115405e-06	0.0129958
9	0.0002632	0.0002653	2.1010409e-06	0.0079826
10	0.0002617	0.0002574	4.2886662e-06	0.0163845
11	0.0002617	0.0002596	2.1425106e-06	0.0081839
12	0.0002688	0.0002680	8.5417363e-07	0.0031766
13	0.0002583	0.0002598	1.4819090e-06	0.0057363
14	0.0002595	0.0002677	8.1326515e-06	0.0313280
15	0.0002674	0.0002607	6.6676060e-06	0.0249288
16	0.0002583	0.0002554	2.8449344e-06	0.0110131
17	0.0002625	0.0002617	7.2285965e-07	0.0027537
18	0.0002606	0.0002656	5.0193821e-06	0.0192593
19	0.000261	0.0002619	7.0330322e-07	0.0026922
20	0.0002624	0.0002591	3.2725621e-06	0.0124710
21	0.0002609	0.0002691	8.1045637e-06	0.0310524
22	0.0002653	0.0002575	7.8666091e-06	0.0296412
23	0.0002666	0.0002572	9.3652187e-06	0.0351254
24	0.0002596	0.0002622	2.574864e-06	0.0099175
25	0.0002636	0.0002627	8.8779659e-07	0.0033677
26	0.0002610	0.0002574	3.5823100e-06	0.0137232
27	0.0002594	0.0002611	1.6750050e-06	0.0064565
28	0.0002603	0.0002591	1.2624165e-06	0.0048484
29	0.0002598	0.0002590	7.9614541e-07	0.0030635
30	0.0002659	0.0002587	7.1252754e-06	0.0267952
31	0.0002574	0.0002665	9.0367435e-06	0.0350988
32	0.0002595	0.0002645	5.0121603e-06	0.0193095
33	0.0002567	0.0002629	6.1746687e-06	0.0240503
34	0.0002615	0.000256	4.6296139e-06	0.0177030
35	0.0002611	0.0002589	2.1917305e-06	0.0083927
36	0.0002627	0.0002615	1.1915016e-06	0.0045350
37	0.0002591	0.0002664	7.3568242e-06	0.02839373
38	0.0002608	0.0002584	2.3971369e-06	0.0091902
39	0.0002618	0.0002583	3.5046910e-06	0.0133840
40	0.0002586	0.0002570	1.5154695e-06	0.0058601
41	0.00026192	0.0002573	4.5562228e-06	0.01739515
42	0.0002648	0.0002622	2.642474e-06	0.0099768
43	0.0002626	0.0002659	3.2248697e-06	0.0122760
44	0.0002604	0.0002606	1.8496524e-07	0.0007102
45	0.0002609	0.0002622	1.2504207e-06	0.0047916
46	0.0002627	0.0002608	1.8942578e-06	0.0072099
47	0.0002624	0.0002598	2.5902812e-06	0.0098702
48	0.0002641	0.0002628	1.2958139e-06	0.0049055
49	0.0002593	0.0002575	1.7971060e-06	0.0069301
50	0.0002612	0.0002630	1.7655929e-06	0.0067575
51	0.0002593	0.0002600	7.3091571e-07	0.0028182
52	0.0002745	0.0002603	1.4151964e-05	0.0515464
53	0.0002631	0.0002642	1.0887334e-06	0.0041378
54	0.0002451	0.0002416	3.5340796e-06	0.01441422

Tabla B.16: Tabla de comparación Delay de escenarios parecidos.

Sim	Delay 600_0 (seg)	Delay 600_1 (seg)	Diferencia Delay (seg)	Diferencia Normalizada
55	0.0002415	0.0002418	2.6380015e-07	0.0010920
56	0.0002400	0.0002406	6.9436796e-07	0.0028931
57	0.0002421	0.0002420	7.0987474e-08	0.0002932
58	0.0002418	0.0002401	1.7366693e-06	0.0071811
59	0.0002411	0.0002400	1.0776650e-06	0.0044692
60	0.0002427	0.0002393	3.4011503e-06	0.0140089
61	0.0002427	0.0002387	4.0713823e-06	0.0167688
62	0.0002413	0.0002400	1.3403238e-06	0.0055533
63	0.0002471	0.0002410	6.0758870e-06	0.0245835
64	0.0002400	0.0002417	1.7040767e-06	0.0070999
65	0.0002420	0.0002411	9.3262062e-07	0.003852
66	0.0002420	0.0002423	2.5181039e-07	0.0010401
67	0.0002399	0.0002417	1.8348500e-06	0.0076471
68	0.0002412	0.0002408	3.2384814e-07	0.0013425
69	0.0002421	0.0002455	3.3473687e-06	0.0138219
70	0.0002400	0.0002424	2.4103837e-06	0.0100420
71	0.0002410	0.0002410	3.4983059e-08	0.0001451
72	0.0002423	0.0002413	1.0117146e-06	0.0041749
73	0.0002424	0.0002437	1.2580704e-06	0.0051881
74	0.0002414	0.0002414	5.5077233e-08	0.0002281
75	0.0002413	0.0002415	2.9519761e-07	0.0012233
76	0.0002417	0.0002466	4.9018917e-06	0.0202785
77	0.0002423	0.0002414	8.7760827e-07	0.0036211
78	0.0002429	0.0002401	2.8609793e-06	0.0117737
79	0.0002395	0.0002407	1.1460456e-06	0.0047840
80	0.0002453	0.0002387	6.6167506e-06	0.0269695
81	0.0002399	0.0002407	7.5450379e-07	0.0031444
82	0.0002392	0.000239	6.6658837e-07	0.0027859
83	0.0002440	0.0002452	1.1517763e-06	0.0047188
84	0.0002419	0.0002422	2.9938326e-07	0.00123742
85	0.0002452	0.0002384	6.7726726e-06	0.0276130
86	0.0002430	0.0002378	5.1642236e-06	0.0212508
87	0.0002446	0.0002445	6.6708720e-08	0.0002726
88	0.0002422	0.0002398	2.3506157e-06	0.0097052
89	0.0002407	0.0002409	1.3525937e-07	0.0005617
90	0.0002421	0.0002399	2.2299905e-06	0.0092079
91	0.0002437	0.0002410	2.7141076e-06	0.01113551
92	0.0002413	0.0002417	3.7403405e-07	0.0015495
93	0.0002405	0.0002389	1.5249313e-06	0.0063405
94	0.0002436	0.0002415	2.0764866e-06	0.0085218
95	0.0002416	0.0002438	2.2136723e-06	0.009160
96	0.0002404	0.0002407	3.3634591e-07	0.0013988
97	0.0002409	0.0002398	1.0902003e-06	0.0045253
98	0.0002401	0.0002415	1.4203207e-06	0.0059147
99	0.0002401	0.0002399	1.9006830e-07	0.0007914
100	0.00024261	0.0002437	1.0952110e-06	0.0045141
101	0.0002403	0.0002402	1.3744352e-07	0.0005718
102	0.0002420	0.0002415	5.0814558e-07	0.0020993
103	0.0002410	0.0002417	6.7747822e-07	0.0028107

B.1.3.3 Jitter

Tabla B.17: Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.

Sim	Jitter 400_0 (seg)	Jitter 400_5 (seg)	Diferencia Jitter (seg)	Diferencia Normalizada
1	0.0001602	0.0001612	9.9999772e-07	0.0062420
2	0.0001602	0.0001612	9.9999772e-07	0.0062420
3	0.0001602	0.0001612	9.9999772e-07	0.0062420
4	8.8007068e-05	8.1944489e-05	6.0625789e-06	0.0688874
5	8.46632606e-05	8.0028926e-05	4.6343336e-06	0.0547384
6	8.9041151e-05	8.4144999e-05	4.8961527e-06	0.0549875
7	8.189885e-05	8.2173484e-05	2.7462646e-07	0.0033532
8	8.6618161e-05	8.9446115e-05	2.8279545e-06	0.0326485
9	9.5716406e-05	8.6733013e-05	8.9833924e-06	0.0938542
10	8.4188325e-05	9.7208135e-05	1.3019810e-05	0.1546510
11	8.2019963e-05	8.6962108e-05	4.9421445e-06	0.0602553
12	8.5001236e-05	8.2632030e-05	2.36920542e-06	0.0278725
13	8.2831478e-05	9.0450689e-05	7.6192113e-06	0.0919844
14	9.2361424e-05	8.3328363e-05	9.0330606e-06	0.09780122
15	8.7138235e-05	8.9040904e-05	1.9026683e-06	0.0218350
16	8.5214045e-05	8.3009650e-05	2.2043956e-06	0.0258689
17	8.4232932e-05	7.9450335e-05	4.7825967e-06	0.0567782
18	9.2412168e-05	8.7044172e-05	5.3679959e-06	0.0580875
19	8.4802890e-05	8.088351e-05	3.9145387e-06	0.04616044
20	8.3931833e-05	8.5266372e-05	1.3345395e-06	0.0159002
21	8.5460580e-05	8.5557694e-05	9.7113257e-08	0.0011363
22	8.7777680e-05	8.5990312e-05	1.78736746e-06	0.0203624
23	8.0319070e-05	8.2972800e-05	2.6537298e-06	0.0330398
24	8.6488713e-05	8.38017835e-05	2.6869294e-06	0.0310668
25	8.5841747e-05	8.2090966e-05	3.7507813e-06	0.0436941
26	8.7509913e-05	8.4669407e-05	2.8405054e-06	0.0324592
27	8.4791098e-05	9.9183347e-05	1.4392249e-05	0.1697377
28	8.4318976e-05	8.5929537e-05	1.6105607e-06	0.0191008
29	8.5190781e-05	8.2154582e-05	3.0361989e-06	0.0356399
30	8.9072072e-05	8.3991888e-05	5.0801840e-06	0.0570345
31	8.4548033e-05	9.1050109e-05	6.5020757e-06	0.07690392
32	8.8460503e-05	9.4527431e-05	6.0669282e-06	0.0685834
33	8.3165553e-05	9.2473785e-05	9.3082320e-06	0.1119241
34	8.8019097e-05	8.5295339e-05	2.7237578e-06	0.0309450
35	8.5032781e-05	8.1007284e-05	4.0254966e-06	0.0473405
36	8.5456978e-05	8.8855400e-05	3.3984222e-06	0.039767
37	8.2236574e-05	8.5828763e-05	3.5921886e-06	0.0436811
38	8.78996025e-05	8.4907473e-05	2.9921292e-06	0.0340403
39	8.3320586e-05	8.5734994e-05	2.4144079e-06	0.0289773
40	8.7848259e-05	8.4475892626e-05	3.3723673e-06	0.0383885
41	8.9380776e-05	9.059445e-05	1.2136782e-06	0.0135787
42	8.8173158e-05	8.8103716e-05	6.9441944e-08	0.000787
43	8.3790798e-05	9.2167283e-05	8.3764850e-06	0.0999690
44	8.3792693e-05	8.7496036e-05	1.2337199e-07	0.0014723
45	8.3455487e-05	8.1713641e-05	1.7418453e-06	0.0208715
46	8.6469034e-05	8.2051629e-05	4.4174047e-06	0.0510865
47	8.5026942e-05	8.6277383e-05	1.2504409e-06	0.0147064
48	8.3169852e-05	0.0001016	1.8471064e-05	0.2220884
49	9.0865517e-05	8.8340114e-05	2.5254037e-06	0.02779275
50	8.7492828e-05	8.8826703e-05	1.33387500e-06	0.0152455
51	8.0299137e-05	8.3897869e-05	3.5987320e-06	0.0448165
52	8.145131558e-05	8.5625537e-05	4.1742220e-06	0.0512480
53	8.3123545e-05	8.1440563e-05	1.6829817e-06	0.020246756
54	6.9667693e-05	6.653396e-05	3.1337252e-06	0.0449810

Tabla B.18: Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.

Sim	Jitter 400_0 (seg)	Jitter 400_5 (seg)	Diferencia Jitter (seg)	Diferencia Normalizada
55	6.4365060e-05	6.4318924e-05	4.6136590e-08	0.00071679
56	6.18803457e-05	6.6760684e-05	4.8803385e-06	0.078867
57	6.6477363e-05	6.61652539e-05	3.12109015e-07	0.004694966
58	6.3386629e-05	6.3365638e-05	2.0990277e-08	0.00033114
59	6.27646834e-05	6.091827e-05	1.84640699e-06	0.0294179
60	6.7483891e-05	6.0845153e-05	6.6387385e-06	0.09837515
61	6.55800628e-05	6.54323649e-05	1.47697904e-07	0.00225217
62	6.19804945e-05	6.1683196e-05	2.972977e-07	0.00479663
63	6.8974084e-05	6.46590746e-05	4.3150094e-06	0.0625598
64	6.279737e-05	6.231538e-05	4.8199133e-07	0.007675
65	6.373658e-05	6.34294298e-05	3.0715434e-07	0.00481912
66	6.655483e-05	6.3241744e-05	3.313086e-06	0.0497798
67	6.3285521e-05	6.41391145e-05	8.5359300e-07	0.01348796
68	6.5563115e-05	6.49924918e-05	5.7062333e-07	0.00870342
69	6.3690719e-05	6.52003105e-05	1.50959065e-06	0.02370189
70	6.44836296e-05	6.33192055e-05	1.1644240e-06	0.01805766
71	6.6925372e-05	6.537532e-05	1.550047247e-06	0.0231608
72	6.45646129e-05	6.31202855e-05	1.44432747e-06	0.0223702
73	6.3806867e-05	6.18012563e-05	2.00561073e-06	0.03143252
74	6.5520076e-05	6.37136356e-05	1.806441e-06	0.0275708
75	6.4822721e-05	6.96689756e-05	4.84625424e-06	0.07476165
76	6.6431239e-05	6.48907352e-05	1.54050383e-06	0.0231894491
77	6.7918435e-05	6.312516282e-05	4.79327303e-06	0.07057396
78	6.60682194e-05	6.318382292e-05	2.88439654e-06	0.04365785
79	6.06845366e-05	6.3539737e-05	2.8552005e-06	0.04704988
80	7.0751816e-05	6.41457858e-05	6.6060302e-06	0.093369
81	6.42064497e-05	6.30026654e-05	1.203784e-06	0.01874865
82	6.2965468e-05	6.56720579e-05	2.706589444e-06	0.04298529
83	6.5665293e-05	6.1026875e-05	4.63841792e-06	0.0706372
84	6.64045985e-05	6.14843726e-05	4.92022598e-06	0.07409465
85	6.528881e-05	6.39529448e-05	1.33586775e-06	0.02046089
86	6.4565822e-05	6.49307340e-05	3.6491143939e-07	0.005651774
87	6.7629475e-05	6.02175762e-05	7.4118988e-06	0.1095956
88	6.359067e-05	6.6311046e-05	2.7203685e-06	0.0427793
89	6.39484e-05	6.242098e-05	1.52741179e-06	0.0238850
90	6.50777543e-05	6.28150186e-05	2.2627356e-06	0.0347697
91	6.73736e-05	6.45569772e-05	2.81667287e-06	0.041806743
92	6.1823961e-05	7.273844424e-05	1.091448270e-05	0.17654130
93	6.56635948e-05	6.37172894e-05	1.946305328e-06	0.02964055
94	6.61407336e-05	6.12263056e-05	4.9144279e-06	0.07430259
95	6.61171366e-05	6.4877938e-05	1.239198156e-06	0.018742465
96	6.4940253e-05	6.20406205e-05	2.89963262e-06	0.04465077
97	6.418138e-05	6.64507038e-05	2.2693238e-06	0.035357978
98	6.48889370e-05	6.61956930e-05	1.3067559343e-06	0.020138347
99	6.330297103e-05	6.790227363e-05	2.81025878e-06	0.04439378
100	6.398372e-05	6.4289655e-05	3.05932525e-07	0.00478141
101	6.2383675e-05	5.89703694e-05	3.41330623e-06	0.05471473
102	6.325182e-05	6.5387517e-05	2.13569618e-06	0.0337649
103	6.309856075e-05	6.5021426e-05	1.9228659e-06	0.0304740

Tabla B.19: Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.

Sim	Jitter 600_0 (seg)	Jitter 600_1 (seg)	Diferencia Jitter (seg)	Diferencia Normalizada
1	0.0002278	0.00022228	5.5867084e-06	0.024522967
2	0.0002278153	0.000222286	5.58670846e-06	0.024522967
3	0.00022781	0.000222286	5.58670846e-06	0.02452296
4	0.000102360	9.408557653e-05	8.27463943e-06	0.0808384
5	9.4685691e-05	9.5478687e-05	7.9299662e-07	0.008375041
6	9.8717034e-05	9.6778859e-05	1.9381752e-06	0.0196336
7	9.35879131e-05	9.2192923e-05	1.39498985e-06	0.014905662
8	9.985842421e-05	9.56091122e-05	4.24931198e-06	0.04255336
9	0.000101084	0.0001045036	3.419553245e-06	0.03382879
10	9.9051176e-05	9.3630299e-05	5.420876582e-06	0.054728038
11	9.86843625e-05	9.60620352e-05	2.622327325e-06	0.026572875
12	0.0001097818	0.0001082615	1.5203513e-06	0.01384883
13	9.39655576e-05	9.63467175e-05	2.38115989e-06	0.02534077
14	9.608459802e-05	0.000108331	1.22472034e-05	0.12746271
15	0.000107701	9.77894795e-05	9.9117926e-06	0.09203041
16	9.46300186e-05	8.99374754e-05	4.692543e-06	0.04958831
17	9.9619629e-05	0.00010011	4.96676889e-07	0.0049857331
18	9.74013071e-05	0.0001056215	8.22025229e-06	0.084395708
19	9.8538588e-05	9.904296816e-05	5.04379503e-07	0.00511859
20	0.0001002	9.5599186e-05	4.62735236e-06	0.046168933
21	9.802188006e-05	0.0001097295	1.170771606e-05	0.119439823
22	0.000104612	9.36062201e-05	1.100662949e-05	0.105212978
23	0.0001064938	9.28189036e-05	1.36749648e-05	0.12841081
24	9.61140305e-05	0.00010029	4.17621523e-06	0.04345063
25	0.0001021092	0.00010159948	5.09723044e-07	0.00499194
26	9.790256668e-05	9.2926650e-05	4.97591659e-06	0.0508251904
27	9.59695144e-05	9.8135033e-05	2.1655188e-06	0.022564653
28	9.691136e-05	9.52605286e-05	1.65083325e-06	0.017034465
29	9.56768519e-05	9.52379963e-05	4.38855612e-07	0.004586852
30	0.0001047	9.48256074e-05	9.87711598e-06	0.09433485
31	9.25386785e-05	0.000106063	1.352463666e-05	0.146151175
32	9.5924273e-05	0.0001044357615	8.5114885e-06	0.08873133
33	9.18143918e-05	0.0001013861	9.5717997e-06	0.10425162
34	9.891765e-05	9.2389587e-05	6.5280693e-06	0.0659949
35	9.769659e-05	9.49495991e-05	2.746990916e-06	0.02811757
36	0.00010039	9.9396034e-05	9.96076415e-07	0.00992185
37	9.50807085e-05	0.000106208	1.112757e-05	0.11703288
38	9.7364037e-05	9.429087e-05	3.0731639e-06	0.03156364
39	9.9049756e-05	9.43856578e-05	4.664098602e-06	0.04708844
40	9.47014971e-05	9.2511478e-05	2.19001894e-06	0.0231254
41	9.9491235e-05	9.3332844e-05	6.15839164e-06	0.06189883
42	0.000103579	0.0001003138	3.2653837e-06	0.03152547
43	0.00010058164	0.0001052680	4.6863864e-06	0.046592859
44	9.714927697e-05	9.74688633e-05	3.1958640e-07	0.00328964
45	9.856666842e-05	0.000100101	1.534805376e-06	0.01557124
46	0.000100485	9.7399902e-05	3.08538618e-06	0.030704854
47	9.9947820e-05	9.659689e-05	3.35092589e-06	0.03352675
48	0.000102754	0.00010099	1.76196968e-06	0.017147371
49	9.567285e-05	9.3275341e-05	2.397516e-06	0.02505952
50	9.857205e-05	0.00010126	2.688519609e-06	0.02727466
51	9.553249e-05	9.7248385e-05	1.715886737e-06	0.01796128
52	0.000118123	9.67155568e-05	2.14079311781e-05	0.181233483
53	0.000101392	0.00010287	1.4853459176e-06	0.014649517
54	7.3325792e-05	6.83658911e-05,	4.95990119e-06	0.06764197

Tabla B.20: Tabla de comparación Jitter de escenarios parecidos.

Sim	Jitter 600_0 (seg)	Jitter 600_1 (seg)	Diferencia Jitter (seg)	Diferencia Normalizada
55	6.81374781e-05	6.8799757e-05	6.622791e-07	0.0097197
56	6.5341846e-05	6.682886e-05	1.4870164e-06	0.022757
57	6.8784238e-05	6.856353e-05	2.20705557e-07	0.00320866
58	6.8066696e-05	6.5930899e-05	2.1357975e-06	0.031378
59	6.7215759e-05	6.566906e-05	1.5466946e-06	0.02301089
60	7.00604719e-05	6.47753148e-05	5.2851570e-06	0.075437
61	7.0016159e-05	6.354986e-05	6.4662948e-06	0.0923543
62	6.7537613e-05	6.580604e-05	1.73156737e-06	0.0256385
63	7.67801717e-05	6.757359e-05	9.20658045e-06	0.1199083
64	6.5512091e-05	6.8394907e-05	2.882816e-06	0.044004
65	6.8803819e-05	6.767719e-05	1.12662209e-06	0.0163744
66	6.86539239e-05	6.94121336e-05	7.5820972e-07	0.0110439
67	6.5554686e-05	6.80526086e-05	2.497921958e-06	0.038104399
68	6.7320182e-05	6.7570585e-05	2.5040280e-07	0.00371958
69	6.8911490e-05	7.460480529e-05	5.693314806e-06	0.08261778
70	6.54977549e-05	6.9655815e-05	4.1580609e-06	0.06348402
71	6.707569e-05	6.7215217e-05	1.3952329e-07	0.0020800
72	6.92646058e-05	6.8057717e-05	1.206888e-06	0.0174243
73	6.9552660e-05	7.10374365e-05	1.4847764e-06	0.02134751
74	6.77162237e-05	6.7955636e-05	2.394130346e-07	0.00353553
75	6.7305830e-05	6.8451709e-05	1.14587854e-06	0.0170249
76	6.81232819e-05	7.6221577e-05	8.0982959e-06	0.118877
77	6.9245272e-05	6.8094899e-05	1.1503732e-06	0.01661302
78	7.0289640e-05	6.6081811e-05	4.207829e-06	0.0598641
79	6.4840239e-05	6.6793726e-05	1.9534874e-06	0.0301277
80	7.4141707e-05	6.3870729e-05	1.027097e-05	0.1385317
81	6.5365848e-05	6.6811690e-05	1.44584148e-06	0.0221192
82	6.4203399e-05	6.56104963e-05	1.4070964e-06	0.0219162
83	7.17699305e-05	7.3632097e-05	1.86216687e-06	0.02594633
84	6.8580909e-05	6.9532819e-05	9.51910217e-07	0.0138801
85	7.3691102e-05	6.335024e-05	1.0340861e-05	0.1403271
86	6.9849260e-05	6.2192952e-05	7.656308e-06	0.1096118
87	7.22164028e-05	7.30194308e-05	8.03027955e-07	0.0111197
88	6.8967852e-05	6.5553583e-05	3.4142689e-06	0.0495052
89	6.671695e-05	6.7258719e-05	5.4176517e-07	0.0081203
90	6.8989488e-05	6.5673856e-05	3.3156319e-06	0.0480599
91	7.1290266e-05	6.7496144e-05	3.7941212e-06	0.0532207
92	6.7508545e-05	6.8403463e-05	8.9491825e-07	0.013256369
93	6.6173178e-05	6.40309968e-05	2.1421811e-06	0.0323723
94	7.106891e-05	6.829108e-05	2.777834e-06	0.03908648
95	6.7939357e-05	7.182243e-05	3.8830819e-06	0.0571551
96	6.6386178e-05	6.7092819e-05	7.0664062e-07	0.01064439
97	6.6801685e-05	6.5188714e-05	1.61297108e-06	0.0241456
98	6.56368623e-05	6.8042478e-05	2.4056164e-06	0.0366503
99	6.5396120e-05	6.59213393e-05	5.2521918e-07	0.0080313
100	6.9731714e-05	7.0901694e-05	1.1699798e-06	0.0167783
101	6.5867123e-05	.62425078e-05	3.7538430e-07	0.0056991
102	6.865916e-05	6.8481527e-05	1.7763424e-07	0.0025871
103	6.699194e-05	6.8412050e-05	1.4201078e-06	0.0211981

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá