



**Análisis del desempeño de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar
IEEE 802.11ac en escenarios interferidos y no interferidos para ambientes
interiores**

Chango Vaca, Luis Xavier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica
Y Telecomunicaciones

Ing. Lara Cueva, Román Alcides PhD.

31 de enero del 2022

COPYLEAKS

Tesis_Chango_FinalV5.pdf

Scanned on: 23:16 January 28, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



Identical Words	185
Words with Minor Changes	26
Paraphrased Words	439
Omitted Words	2820



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Análisis del desempeño de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac en escenarios interferidos y no interferidos para ambientes interiores" fue realizado por el señor **Chango Vaca, Luis Xavier** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de enero de 2022

Firma:



ROMAN
ALCIDES LARA

Ing. Lara Cueva, Román Alcides PhD.

C. C.: 1713988218



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Chango Vaca, Luis Xavier**, con cédula de ciudadanía n° 1753048394, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis del desempeño de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac en escenarios interferidos y no interferidos para ambientes interiores** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 31 de enero de 2022

Firma

Chango Vaca, Luis Xavier

C.C.: 1753048394



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Chango Vaca, Luis Xavier**, con cédula de ciudadanía n° 1753048394, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis del desempeño de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac en escenarios interferidos y no interferidos para ambientes interiores** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 31 de enero de 2022

Firma

Chango Vaca, Luis Xavier

C.C.: 1753048394

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo de investigación a mi madre, Sandra, quien con mucho cariño y de forma incondicional me ha apoyado a lo largo de toda mi vida y ha sido mi soporte en los momentos más difíciles. A mi hermana Michelle por su ayuda en todo momento y por ser un ejemplo a seguir.

Este logro es para ustedes.

Luis Xavier Chango Vaca

Agradecimiento

Agradezco a Dios por brindarme la salud y fuerza necesarias para conseguir este objetivo que me permite culminar esta etapa de aprendizaje por la cual me he esforzado tanto.

A mi madre Sandra quien con mucho sacrificio ha dedicado su vida a proveer en el hogar y ha cuidado siempre de mí y mi hermana con mucho amor con el afán de vernos cumplir nuestras metas. Admiro tu fortaleza.

A mi hermana Michelle por siempre tener palabras de ánimo que me motivaron y me ayudaron a no rendirme pese a las adversidades.

A todos quienes en algún momento han formado parte de mi vida y me han brindado su apoyo desinteresadamente, familiares y amigos con quienes he compartido los momentos más alegres.

Finalmente quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Román Lara por su constante apoyo, sus enseñanzas y consejos como director del proyecto de investigación que permitieron el desarrollo de este trabajo.

Luis Xavier Chango Vaca

ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen.....	19
Abstract.....	20
Capítulo 1.....	21
Introducción.....	21
Motivación e Importancia.....	22
Antecedentes	24
Alcance	27
Objetivos	29
Objetivo General.....	29
Objetivos Específicos.....	29
Capítulo 2.....	30
Marco Teórico	30
Red de Telecomunicaciones.....	30
Elementos básicos de una red de Telecomunicaciones.....	30
Clasificación de redes.....	31
Redes según su tamaño o alcance.....	31
Redes PAN.....	31
Redes LAN.....	32

Redes MAN.	32
Redes WAN.	32
Redes según su medio físico de conexión.	32
Medios Guiados.	32
Medios no Guiados.	33
Redes según la Topología.	33
Topología en Bus.	33
Topología en Anillo.	34
Topología en Estrella.	34
Topología en Malla.	34
Modo Ad-Hoc (IBSS, del inglés Independent Basic Service Set).	35
Modo Infraestructura (BSS, del inglés Service Set).	35
Conjunto de Servicios Extendidos (ESS, del inglés Extended Service Set).	35
Redes Inalámbricas	36
Ventajas de las Redes Inalámbricas.	36
Desventajas de las Redes Inalámbricas.	37
Redes Inalámbricas por su cobertura.	37
Redes De Área Local Inalámbrica (WLAN).	38
El Estándar IEEE 802.11	38
Capas Definidas por el Estándar IEEE 802.11	39
Capa Física.	40

	10
PLCP (del inglés Physical Layer Convergence Protocol)	40
PMD (del inglés Physical Medium Dependent)	40
FHSS (del inglés Frequency Hopping Spread Spectrum).....	41
DSSS (del inglés Direct Sequence Spread Spectrum)	41
OFDM (del inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing).....	42
Capa MAC (del inglés Medium Access Control)	42
DCF (del inglés Distributed Coordination Function).....	43
PCF (del inglés Point Coordinated Function)	43
Enmiendas IEEE 802.11	44
El Estándar IEEE 802.11ac.....	45
Canales en el Estándar IEEE 802.11ac.....	46
Tecnología MIMO (del inglés Multiple-Input Multiple-Output).....	47
Tecnología MU-MIMO (del inglés Multi-User Multiple-Input Multiple- Output).....	48
Intervalo de Guarda (GI, del inglés Guard Interval)	48
Flujos Espaciales	49
Esquemas de Modulación y Codificación (MCS, del inglés Modulation and Coding Schemes)	49
Modulación 256 QAM	50
Velocidad de Datos	50
IEEE 802.11ac Wave 1 y Wave 2	51
Interferencias	52

	11
Interferencia Co-Canal.	53
Interferencia de Canal Adyacente.	53
Tecnología WiFi.....	53
Calidad de Servicio (QoS).....	54
Retardo (Delay).....	54
Variación del Retardo (Jitter).....	54
Paquetes Perdidos (Packet Loss).	54
Throughput.....	55
Protocolo NTP	55
Capítulo 3.....	56
Materiales y Métodos	56
Materiales	56
Routers Inalámbricos.	56
Características del Router Archer C6U AC1200.	57
Características del Router Archer C60 AC1350.....	58
GUI de Configuración de Routers TP-Link.....	60
PC Portátiles y Tarjetas de Interface de Red.....	61
Características PC portátiles.....	61
Características Tarjeta de Red Intel Dual Band Wireless-AC 7265.....	62
Características Tarjeta de Red Intel Wireless-AC 9462.	63
Sistema Operativo Ubuntu.	63

	12
Herramientas para la Inyección de Tráfico.	64
D-ITG.	65
Arquitectura de D-ITG.....	65
Métodos.....	67
Sincronización de Relojes.	67
Asignación de Canales.....	67
Escenario no Interferido.....	68
Escenario Interferido.....	68
Determinación de la Capacidad Máxima del Canal.	68
Escaneo de la red 5GHz.	68
WiFi Analyzer.	69
Capítulo 4.....	73
Diseño e Implementación de la Red.....	73
Descripción del lugar donde se implementa la red.....	73
Escenarios de Prueba.....	73
Escenario 1: Wave 1 sin interferencias.....	74
Escenario 1: Wave 1 interferido.....	75
Escenario 2: Wave 2 sin interferencias.....	75
Escenario 2: Wave 2 interferido.....	76
Balance del Enlace	77
Modelo de propagación para ambientes interiores.	77

	13
Potencia recibida.....	79
Potencia recibida escenario 1.....	79
Potencia recibida escenario 2.....	80
Configuración del AP y Routers	80
Configuración de la GUI de D-ITG	81
Transmisor.	81
Receptor.....	85
Cálculo del Número de muestras	87
Capítulo 5.....	90
Análisis de Resultados	90
Throughput Normalizado.....	90
Resultados Escenario 1: Wave 1 sin interferencias.....	91
Resultados Escenario 1: Wave 1 interferido.....	93
Resultados Escenario 2: Wave 2 sin interferencias.....	95
Throughput Normalizado Escenario 2: Wave 2 interferido	98
Comparativa de Resultados.....	101
Comparativa de Resultados Throughput Normalizado	102
Comparativa de Resultados Delay.....	107
Comparativa de Resultados Jitter	111
Comparativa de Resultados Paquetes Perdidos	116
Capítulo 6.....	121

Conclusiones y Trabajos Futuros	121
Conclusiones	121
Trabajos Futuros.....	125
Referencias	126
Anexos	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sensibilidad mínima en el receptor	49
Tabla 2 Velocidades del estándar IEEE 802.11ac de acuerdo al número de flujos espaciales y ancho de banda de canal.....	51
Tabla 3 Especificaciones de las fases Wave del Estándar IEEE 802.11ac.....	52
Tabla 4 Características del Router Archer C6U AC1200	57
Tabla 5 Características del Router Archer C60 AC1350.....	58
Tabla 6 Características PC portátiles	62
Tabla 7 Características NIC Dual Band Wireless-AC 7265.....	62
Tabla 8 Características NIC Wireless-AC 9264	63
Tabla 9 Parámetros definidos para el AP y routers.....	81
Tabla 10 Parámetros del flujo de datos configurados en el transmisor Escenario 1.....	82
Tabla 11 Parámetros del flujo de datos configurados en el transmisor Escenario 2.....	83
Tabla 12 Parámetros de configuración en el transmisor	85
Tabla 13 Parámetros de configuración en el receptor.....	86
Tabla 14 Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno no interferido	91
Tabla 15 Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno no interferido	92
Tabla 16 Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno interferido	93
Tabla 17 Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno interferido	94
Tabla 18 Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno no interferido	96

Tabla 19 Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno sin interferencias	97
Tabla 20 Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno interferido	98
Tabla 21 Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno interferido	99
Tabla 22 Resultados obtenidos de las métricas de desempeño en cada escenario de prueba	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo Simplificado de un Sistema de Comunicaciones	31
Figura 2 Capas definidas por el estándar IEEE 802.11 del Modelo de Referencia OSI .	40
Figura 3 Canales disponibles en distintas regiones del mundo para el Estándar IEEE 802.11ac	47
Figura 4 Router Archer C6U AC1200	58
Figura 5 Router Archer C60 AC1350	60
Figura 6 GUI web para configuración de equipos TP-Link	61
Figura 7 Arquitectura D-ITG	66
Figura 8 Escaneo de las redes de 5 GHz sin canales solapados.....	70
Figura 9 Escaneo de las redes de 5 GHz con canales solapados	71
Figura 10 Escaneo de las redes de 2.4 GHz	72
Figura 11 Esquema del Escenario de Prueba 1	75
Figura 12 Esquema del Escenario de Prueba 1	75
Figura 13 Esquema del Escenario de Prueba 2.....	76
Figura 14 Esquema del Escenario de Prueba 2.....	77
Figura 15 GUI D-ITG, Configuración del Flujo en el transmisor para el Escenario 1	82
Figura 16 GUI D-ITG, Configuración del Flujo en el transmisor para el Escenario 2.....	83
Figura 17 GUI D-ITG, Configuración en el transmisor	85
Figura 18 GUI D-ITG, Configuración de la Pestaña Analyzer en el receptor.....	87
Figura 19 Throughput normalizado. Escenario 1, protocolo UDP	103
Figura 20 Throughput normalizado. Escenario 1, protocolo TCP	104
Figura 21 Throughput normalizado. Escenario 2, protocolo UDP	105
Figura 22 Throughput normalizado. Escenario 2, protocolo TCP	106
Figura 23 Delay. Escenario 1, protocolo UDP.....	108

Figura 24 Delay. Escenario 1, protocolo TCP	109
Figura 25 Delay. Escenario 2, protocolo UDP.....	110
Figura 26 Delay. Escenario 2, protocolo TCP	111
Figura 27 Jitter. Escenario 1, protocolo UDP	112
Figura 28 Jitter. Escenario 1, protocolo TCP	114
Figura 29 Jitter. Escenario 2, protocolo UDP.....	115
Figura 30 Jitter. Escenario 2, protocolo TCP	116
Figura 31 Paquetes perdidos. Escenario 1, protocolo UDP	117
Figura 32 Paquetes perdidos. Escenario 1, protocolo TCP.....	118
Figura 33 Paquetes perdidos. Escenario 2, protocolo UDP	119
Figura 34 Paquetes perdidos. Escenario 2, protocolo TCP.....	120

Resumen

En la actualidad y debido a la permanente necesidad de mantenernos comunicados, el desarrollo de la tecnología inalámbrica presenta un gran avance, es por esto que se originan métodos para determinar la eficiencia y evaluar las métricas de Calidad de Servicio (QoS del inglés *Quality of Service*) relacionadas a estas redes. En el presente proyecto se logró determinar el rendimiento de una red WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac en dos escenarios de pruebas: en el primer escenario relacionado a Wave 1 se determinaron las métricas QoS de la red sin hacer uso de la tecnología MU-MIMO (del inglés *Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*), mientras que en el segundo escenario referente a Wave 2 se obtuvieron dichas métricas con el uso de MU-MIMO. En cada escenario de prueba se comprobó además el desempeño de la red en entornos no interferidos e interferidos con el uso de los protocolos UDP y TCP. Para la evaluación de los enlaces se utilizó el software D-ITG, a modo de determinar la máxima capacidad del canal y posteriormente realizar las inyecciones necesarias para obtener las métricas de desempeño asociadas a la QoS, *throughput*, *delay*, *jitter* y paquetes perdidos. Se identificó una reducción en la eficiencia de los entornos interferidos respecto a los no interferidos del 1.18% para UDP y 1.89% para TCP para Wave 1, mientras que para Wave 2 se tiene una reducción del 0.42% con UDP y 0.31% para TCP lo cual indica que MU-MIMO es más efectivo frente a las interferencias.

PALABRAS CLAVE:

- **QOS**
- **WIFI**
- **D-ITG**
- **MU-MIMO**

Abstract

At present and due to the permanent need to keep in touch, the development of wireless technology presents a great advance, which is why methods are originated to determine the efficiency and evaluate the metrics of Quality of Service (QoS) related to these networks. In the present project, it was possible to determine the performance of a WiFi network in accordance with the IEEE 802.11ac standard in two test scenarios: in the first scenario related to Wave 1, the QoS metrics of the network were determined without using MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple Output) technology, while in the second scenario referring to Wave 2 these metrics were obtained with the use of MU-MIMO. In each test scenario, the performance of the network was also verified in non-interfered and interfered environments with the use of the UDP and TCP protocols. For the evaluation of the links, the D-ITG software was used, in order to determine the maximum capacity of the channel and subsequently carry out the necessary injections to obtain the performance metrics associated with QoS, throughput, delay, jitter and lost packets. A reduction in the efficiency of the interfered environments with respect to the non-interfered ones of 1.18% for UDP and 1.89% for TCP for Wave 1 was identified, while for Wave 2 there is a reduction of 0.42% with UDP and 0.31% for TCP which indicates that MU-MIMO is more effective against interference.

KEYWORDS:

- **QOS**
- **WIFI**
- **D-ITG**
- **MU-MIMO**

Capítulo 1

Introducción

Desde sus inicios, un aspecto fundamental en el desarrollo de la sociedad humana ha sido la comunicación, sin embargo, antiguamente este proceso era muy complicado de establecer cuando los interlocutores se encontraban separados por grandes distancias territoriales, debido a las escasas herramientas con la que se contaba en ese momento.

Es por ello que desde tales épocas y pese a la limitación tecnológica, se han empleado diferentes técnicas para tratar de satisfacer esta necesidad; desde las comunicaciones a través de señales de humo, señales sonoras, palomas mensajeras, etc. Sin embargo, no es hasta la creación del telégrafo que las comunicaciones a largas distancias inician un proceso de desarrollo muy importante el cual ha tenido varios momentos cruciales que han significado puntos de inflexión en el desarrollo tecnológico hasta llegar a la actualidad donde existen diferentes técnicas y dispositivos que permiten a los usuarios mantenerse permanentemente comunicados en prácticamente cualquier lugar del mundo con el fin de satisfacer las necesidades de la sociedad actual en diferentes ámbitos como el académico, laboral u organizacional.

En este contexto, las redes inalámbricas presentan un gran avance, ya que permiten a las personas mantenerse comunicadas sin restringir su movilidad, es por ello que tecnologías como WiFi (del inglés *Wireless Fidelity*), se han popularizado mucho en los últimos años y han tenido una alta demanda en el mercado.

El estándar IEEE 802.11 es parte de las redes de área local inalámbricas (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*), el mismo ha sido objeto de un constante desarrollo con el fin de mejorar enmiendas anteriores y ofrecer al usuario un

producto que cumpla con las características de Calidad de Servicio (QoS, del inglés *Quality of Service*).

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se propone el levantamiento de una WLAN en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac, donde se establecen dos escenarios, en el primero se implementa un enlace en el que operan un Punto de Acceso (AP, del inglés *Access Point*) y dos estaciones suscriptoras (SS, del inglés *Subscriber Station*), mientras que para el segundo escenario se implementa un enlace donde intervienen únicamente un AP y una SS; en dichos escenarios y con el uso de la herramienta de inyección de tráfico D-ITG (del inglés *Distributed Internet Traffic Generator*) se determinan las métricas de desempeño en ambientes interferidos y no interferidos, con el fin de evaluar el rendimiento ofrecido por la red bajo ambas circunstancias en términos de estos parámetros.

Motivación e Importancia

En un mundo globalizado como en el que vivimos, el intercambio de información y la capacidad de comunicarnos en cualquier momento y lugar es fundamental para casi cualquier ámbito de la vida cotidiana.

Actualmente la humanidad convive con una pandemia mundial que ha cambiado drásticamente la vida de las personas y como estas desenvuelven sus actividades del día a día, debido a que muchas naciones han tenido que desplegar protocolos de confinamiento masivo, con lo que han tomado mayor relevancia modalidades de desarrollo de actividades que permiten al individuo realizarlas remotamente desde su hogar; como el teletrabajo, clases *online*, diferentes actividades sociales, etc., mismas que se llevan a cabo a través de plataformas de videoconferencia las cuales demandan una permanente conexión a Internet.

En años previos, el crecimiento de las redes inalámbricas ya era significativo, sin embargo, con la aparición de la pandemia y las nuevas modalidades de trabajo es normal pensar que hoy ese desarrollo es incluso todavía más importante y se ejecuta de manera más acelerada. Una de las principales tecnologías en las que se centran los esfuerzos son las WLAN, debido a que muchos de los dispositivos que utilizan las personas como smartphones, tabletas e incluso PC portátiles tienen como única interfaz de acceso a Internet el medio inalámbrico.

Las WLAN se han establecido como una de las principales para el acceso a la red y a los servicios (Aman & Sikdar, 2012). Estas redes permiten la interconexión entre personas dentro de diferentes ámbitos, principalmente a nivel académico, profesional, organizacional y distintas actividades de la vida cotidiana, debido a las diferentes ventajas que estas ofrecen al consumidor, en este sentido la movilidad pedestre representa la principal virtud de estas redes, puesto a que se habla de tecnología inalámbrica que permite a las personas desplazarse libremente dentro de un área de cobertura que puede ser tanto en ambientes de interior como exterior.

WiFi es la aplicación de mayor aceptación en las redes WLAN, esta tecnología se basa en el estándar IEEE 802.11, que desde su aparición ha sido objeto de mejoras en aspectos relacionados a la velocidad de transmisión, anchos de banda utilizados, área que puede ser servida y compatibilidad con versiones anteriores.

IEEE 802.11ac comprende una de las versiones más recientes del estándar inalámbrico y se caracteriza por ofrecer altas tasas de transmisión de forma segura y fiable (Ong et al., 2011). Dicho estándar se aprobó en el año 2014 como propuesta de mejora al estándar IEEE 802.11n y permite tasas de hasta 1.3 Gbps, además en la banda de 5 GHz admite anchos de banda de hasta 80+80MHz (Lara-Cueva et al., 2017).

La tecnología WiFi ha tenido un éxito comercial muy importante y su uso es muy común actualmente ya que ofrece interoperabilidad entre dispositivos de uso diario como smartphones, smartTV's, PC's, etc. Además, las velocidades moderadas alcanzadas y el bajo costo de los equipos han permitido a esta tecnología mantener un continuo crecimiento en el mercado (Sendra et al., 2010). Esta permanente demanda requiere que el estándar se actualice constantemente con el fin de entregar cada vez un mejor servicio al cliente o usuario.

En este contexto, un aspecto importante no solo dentro las redes WLAN sino de cualquier red de comunicaciones que se despliegue, es la QoS ofrecida a los usuarios, ya que deben existir índices y parámetros que garanticen un mínimo nivel de fiabilidad que permita al cliente permanecer comunicado de forma ininterrumpida y mantener tasas de velocidad suficientemente efectivas.

Es fundamental identificar y analizar los parámetros que nos permitan determinar si el servicio ofrecido es suficientemente bueno o no. Al hablar del estándar IEEE 802.11 las métricas de desempeño que se pueden medir para determinar el rendimiento son: *jitter*, *throughput*, *delay* y *packet loss* (Fernandez & Lara-Cueva, 2016).

Antecedentes

Para el estudio del estándar IEEE 802.11ac se toma indaga en documentos de investigación relacionados al análisis de redes basadas en el estándar IEEE 802.11 y sus enmiendas. Se tiene como principal enfoque aquellos que se centran en determinar el rendimiento de las redes implementadas bajo estos estándares a través de *testbed*.

Es así que en (Mero García, 2017) se analiza la implementación de una red basada en el estándar IEEE 802.11ac para lo cual se efectúa un estudio de la situación de la red actual y un análisis comparativo entre los estándares IEEE 802.11ac e IEEE

802.11n para determinar cual ofrece un mejor desempeño. Como herramienta de software se utilizó Radio Mobile para realizar la simulación de los radio-enlaces.

Por otro parte en el estudio presentado en (López López, 2018) a través de la generación de distintos modelos de transporte de datos virtuales para medios guiados y no guiados se estima la capacidad y rendimiento que pueden alcanzar el estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO frente al estándar de fibra óptica para lo cual se utiliza como herramienta de simulación el software ns-3.

Además el estudio basado en simulación presentado en (Ortiz Puga, 2015) propone el análisis comparativo de los estándares IEEE 802.11ac e IEEE 802.11n donde a través del software OMnet++ se plantean escenarios de prueba en concordancia con cada estándar para posteriormente concluir que el estándar IEEE 802.11ac es más eficiente que el estándar IEEE 802.11n debido a las tasas de transmisión obtenidas tanto en el caso ideal como en el real.

En el artículo presentado en (Vallejo-Baldeon et al., 2017) se realiza el análisis del desempeño de una red en entornos de interiores para dos escenarios, con y sin interferencia co-canal para la cual se recurre al uso de la técnica de inyección de tráfico a modo de extraer los datos de las métricas de QoS donde se toma el *throughput* normalizado como medida del rendimiento. Se determina finalmente que el estándar IEEE 802.11n presenta una reducción del 35% en su desempeño en los escenarios con interferencias co-canal respecto a los escenarios sin interferencia.

El estudio de (Vallejo Baldeón, 2016) detalla el análisis del rendimiento del estándar IEEE 802.11n en base a las métricas de QoS, para ello se utiliza el software D-ITG para la inyección de tráfico en escenarios controlados de prueba, estos son: interferidos y medianamente interferidos.

En (Cano D. & Almeida G., 2012) se propone la implementación de redes WiLD (del inglés *Wireless Fidelity for Long Distance*) con distancias superiores a 50 km, para lo cual se utilizan ns-2 y Radio Mobile como software de simulación para la planificación de la red y la plataforma D-ITG para la inyección de tráfico a manera de evaluar los parámetros de QoS.

En (Lara-Cueva et al., 2017) se determina el rendimiento de WiFi basada en los estándares IEEE 802.11b/n/ac y WDS en ambientes interiores, para esto se utiliza la técnica intrusiva de inyección de tráfico a través de D-ITG en tres escenarios propuestos diferenciados por la distancia entre el AP y el cliente y el número de obstáculos entre ellos.

De acuerdo a lo anterior se puede decir que existen estudios relacionados al análisis de redes WLAN en concordancia con el estándar IEEE 802.11 donde se evalúa el rendimiento de estas redes a través de las métricas de desempeño que ya han sido mencionadas, sin embargo en el caso del estándar 802.11ac no existe una documentación amplia acerca de cómo se desempeñan estas redes dentro de ambientes con y sin interferencias del tipo co-canal que permita diferenciar entre ambos escenarios y determinar de manera cuantitativa en cuál de los dos ambientes la red ofrece mejores prestaciones y si la diferencia es significativa en términos de eficiencia.

El presente proyecto de investigación se centra fundamentalmente en analizar el rendimiento de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac para lo que se propone el levantamiento de una WLAN en la que se estudie y analice ambos escenarios y se pueda concluir a través de la interpretación de los datos extraídos bajo qué condiciones se obtiene un mejor desempeño de la red.

Alcance

El permanente desarrollo de las redes que forman parte de la familia IEEE 802.11, ha permitido que la tecnología WiFi que implementa sus últimas versiones permita ofrecer a los usuarios dispositivos con altas tasas de transferencia, con anchos de banda sobre los 40 MHz y que ofrecen bajos tiempos de retardo. Esto genera la necesidad de realizar un análisis del rendimiento de las distintas versiones del estándar definido por la IEEE que permita identificar cuáles son las características que las hacen mejores a versiones antecesoras.

Se han realizado distintos estudios acerca de cómo se desempeñan estas redes, los mismos pretenden realizar una comparación entre las distintas versiones del estándar que trabajan en la misma banda de frecuencia (2.4 o 5 GHz), para lo que se utilizan procedimientos como la técnica intrusiva de inundación de tráfico, la misma que consiste en enviar paquetes de distintos tamaños hasta encontrar uno que sea lo suficientemente grande para saturar el canal, al tener este tamaño como referencia se realizan más envíos de paquetes y se reduce progresivamente el tamaño del paquete, hasta conseguir en la recepción una pérdida igual o inferior a 5% en los paquetes.

El presente proyecto de investigación pretende determinar el desempeño del estándar IEEE 802.11ac en dos escenarios, para el primero se implementa un enlace *downlink* con un ancho de banda de 80 MHz y un flujo espacial a ser enviado, mientras que para el segundo escenario de la misma forma se establece un enlace *downlink* con un ancho de banda de canal de 80 MHz y dos flujos espaciales para la transmisión, en ambos escenarios se tiene planteado realizar las mediciones en ambientes no interferidos donde solo operan el AP y los SS y para el caso de ambientes interferidos se configura los AP extras de modo que operen en el mismo canal que el AP principal.

La implementación de la red se realiza en un ambiente interior en un espacio aproximado de $50 m^2$, el mismo que tiene características de un departamento residencial u oficina de trabajo donde los equipos mantienen permanentemente línea de vista.

La implementación de los escenarios previstos busca establecer una red donde se midan las métricas de desempeño *jitter*, *throughput*, *delay* y *packet loss* para lo cual se utiliza la técnica de inundación de tráfico y se evalúa el uso de gestores de tráfico como iPERF, jPERF, D-ITG, etc.

Para cumplir con el alcance del presente proyecto, se definen los siguientes objetivos.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el desempeño de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac en escenarios interferidos y no interferidos para ambientes interiores.

Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte referente al análisis del desempeño de redes WLAN en concordancia con el estándar IEEE 802.11.
- Implementar una red de área local inalámbrica (WLAN) en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac compuesta por tres AP (*Access Point*) y dos PC portátiles como estaciones suscriptoras.
- Implementar un enlace entre un AP (*Access Point*) y dos estaciones suscriptoras para el análisis del estándar IEEE 802.11ac en su versión WAVE 1 y un enlace entre un AP y una estación suscriptora para la versión WAVE 2 del mismo estándar.
- Evaluar el desempeño de las redes en los escenarios propuestos mediante la técnica de inyección de tráfico.
- Analizar los resultados obtenidos de las métricas de desempeño en función del jitter, throughput, delay y paquetes perdidos.

Capítulo 2

Marco Teórico

Red de Telecomunicaciones

Una red de telecomunicaciones es aquella que permite la transmisión e intercambio de información entre un emisor y uno o varios receptores a través de medios cableados, ópticos o inalámbricos, dicha red está conformada por los sistemas de transmisión, equipos de conmutación y demás recursos que permitan ejecutar este proceso. El propósito de una red de telecomunicaciones es permitir la comunicación entre usuarios a distancia, para lo cual se hace uso de servicios de muy variada naturaleza y que permiten el intercambio de información como: datos, imágenes, voz, video, etc (Huidobro Moya, 2006).

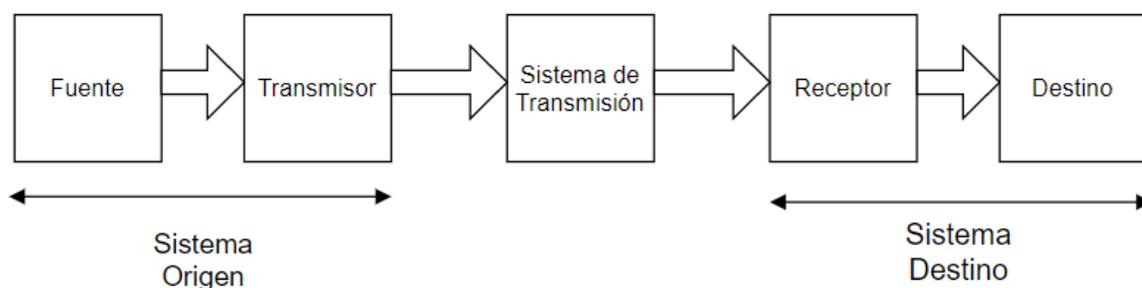
Elementos básicos de una red de Telecomunicaciones

El modelo básico de una red o sistema de telecomunicaciones lo conforman tres subsistemas: un sistema de origen, un sistema de transmisión y un sistema de destino. El sistema de origen está compuesto por la fuente y el transmisor, la fuente es la que genera la información que se desea transmitir mientras que el transmisor es el encargado procesar los datos para adecuarlos al medio por el cual se pretende enviarlos. El sistema de transmisión hace referencia al medio físico y demás equipos o nodos intermediarios que permiten transportar el conjunto de datos desde un punto hacia otro. El sistema de destino consta de un receptor y un destino, el receptor ejecuta el proceso inverso al transmisor con el fin de convertir los datos en información entendible para el destino que conforman el o los dispositivos a los cuales se dirige la información en un principio (Gil et al., 2010). Esta estructura se mantiene tanto para redes sencillas como para aquellas que son más complejas.

La Figura 1 muestra un esquema de un sistema de telecomunicaciones básico con sus principales elementos descritos anteriormente.

Figura 1

Modelo Simplificado de un Sistema de Comunicaciones



Nota, Adaptado de *Redes y Transmisión de Datos* (p. 16), por Gil et al., 2010.

Clasificación de redes

En la actualidad existe una gran variedad de redes implementadas las mismas que presentan ciertas características que permiten clasificarlas, se tiene así fundamentalmente tres criterios para diferenciarlas:

Redes según su tamaño o alcance. Este tipo de redes toma como criterio de clasificación el área de cobertura que ofrece la red, la cual puede ir desde unos pocos metros hasta varios kilómetros de distancia entre los dispositivos terminales.

Redes PAN. Las redes de área personal (PAN, del inglés *Personal Area Network*) son aquellas que permiten la comunicación en el rango desplazamiento de una persona, usualmente la distancia que cubren es de alrededor de 10 metros y están orientadas a conexiones inalámbricas, además este tipo de redes pueden ser interconectadas a otras redes o a Internet (Molina Fernández de Castro, 2003). Una de las tecnologías más utilizadas en este tipo de redes es *Bluetooth*.

Redes LAN. Las redes de área local (LAN, del inglés *Local Area Network*) son aquellas que cubren un área con una extensión de hasta unos pocos kilómetros, desplegadas en entornos donde se requiere la compartición e intercambio de recursos y datos. Para estas redes se usa tanto medios cableados como inalámbricos (Zuñiga Lopez, 2005).

Redes MAN. Las redes de área metropolitana (MAN, del inglés *Metropolitan Area Network*) se forman a partir de la interconexión de varias redes LAN y están orientadas para dar cobertura en zonas urbanas puesto a que delimitan un radio máximo de 50 kilómetros para el servicio (Zuñiga Lopez, 2005) y al igual que las redes LAN permiten el uso de medios cableados e inalámbricos para el transporte de la información.

Redes WAN. Las redes de área amplia (WAN, del inglés *Metropolitan Area Network*) son redes que cubren zonas geográficas muy extensas y se utilizan para interconectar LANs, permiten transmitir un gran volumen de información sin embargo, las velocidades alcanzadas son menores debido a la gran distancia que deben atravesar los datos (Cabarcas Martínez & Marrugo Catro, 2008). El mayor exponente de este tipo de redes es la propia Internet.

Redes según su medio físico de conexión. Para clasificar a las redes según su medio físico de conexión, se toma en consideración la naturaleza del medio que transporta las señales.

Medios Guiados. En este tipo de redes los enlaces de transporte de la información entre los elementos se dan a través de un material que permite canalizar la señal enviada. Los medios guiados admiten el uso de dos tipos de señales para el transporte de la información, estas son las señales eléctricas que utilizan principalmente

el cobre como material de transporte y las señales ópticas que utilizan fibra óptica la cual conduce los haces de luz (López López, 2018).

Existen factores a considerar a la hora de elegir el medio a utilizar para la interconexión de los elementos de la red como: la distancia entre los equipos y nodos, la necesidad de robustez frente a los efectos provocados por interferencia electromagnética y radioeléctrica, la capacidad de canal del medio, etc. Se tiene así como principales medios guiados el par trenzado y cable coaxial para el transporte de señales eléctricas y la fibra óptica para las señales ópticas como ya se ha mencionado anteriormente.

Medios no Guiados. En las redes que se utiliza este tipo de medios, la información se transporta en forma de ondas electromagnéticas y utilizan como medio de transmisión el aire. Este tipo de redes también conocidas como inalámbricas han tenido un gran crecimiento y tiene una presencia muy importante dentro de las telecomunicaciones en servicios como televisión, radio, comunicaciones celulares, satélites, microondas, infrarrojo, entre otros (Santos Gonzáles, 2014).

Redes según la Topología. La topología indica cómo están interconectados los distintos dispositivos que conforman la red ya sea de forma física o lógica. Representa de forma geométrica los enlaces que se dan entre los dispositivos y nodos de modo que se obtiene un mapa de distribución de la red (Huidobro, 2014).

Topología en Bus. Se caracterizan por disponer de un único canal común para la interconexión de todos los dispositivos y nodos de la red. Presentan como ventajas que son fáciles de instalar y además son flexibles en cuanto a la capacidad de aumentar o disminuir el número de terminales, sin embargo, los datos enviados desde un dispositivo son recibidos por todos los elementos que conforman dicha red, lo cual

puede representar una desventaja, además un fallo en la línea común inhabilita por completo a toda la red (Zuñiga Lopez, 2005).

Topología en Anillo. Esta topología se conforma a partir de la conexión de los nodos de la red en forma de un bucle cerrado con forma de anillo. Los enlaces en esta topología son *simplex* por lo cual los datos se transmiten en un solo sentido, es por esto que cada estación participa en dos enlaces, uno de transmisión y otro de recepción. Las ventajas de esta topología son las siguientes: permite alcanzar grandes velocidades, presenta facilidad de implementación de mecanismos que previenen colisiones y permite escalabilidad. Como principal desventaja se tiene que, si existe una ruptura en el cable que forma el anillo entonces la red queda inoperante en uno de los enlaces (Arias Guadarrama, 2005).

Topología en Estrella. La principal característica de esta topología, es la presencia de un nodo central el cual se conecta directamente a todos los demás dispositivos de la red, por lo cual la comunicación entre las estaciones requiere que la información pase por el nodo central el cual tiene la función de administrar la prioridad y procedencia de los datos y distribuirlos en función del destino que tengan (Zuñiga Lopez, 2005).

Topología en Malla. Es una topología donde cada dispositivo está conectado a través de un enlace punto a punto dedicado a cualquier otro dispositivo de la red, el propósito de esta configuración es que la información enviada solo llegue a los dispositivos interconectados, además una de las ventajas que presenta esta topología es la redundancia, ya que existen diferentes caminos para llegar a un determinado punto con lo que si se presenta una falla en una de las líneas de comunicación, el flujo de datos puede tomar otra ruta para llegar a su destino, sin embargo su principal desventaja es que está ideada para redes pequeñas y de pocos elementos ya que se

requiere una gran cantidad de medios para levantar los enlaces, esto provoca un elevado costo en la instalación y escalamiento de la red (Criollo Bustamante, 2010).

Modo Ad-Hoc (IBSS, del inglés Independent Basic Service Set). Este esquema indica cómo se realiza la comunicación entre nodos de una red inalámbrica, en dicho esquema cada elemento se comunica directamente con los otros que se encuentren dentro del área de cobertura a través de señales de radio y sin la necesidad utilizar un AP para lo cual los dispositivos y nodos deben operar en el mismo canal de radio y configurar un identificador denominado SSID (del inglés *Service Set Identifier*). En este tipo de topología también conocida como IBSS todos los nodos tienen el mismo nivel jerárquico y no existe algún elemento que se encargue de la administración. Como una ventaja de utilizar este tipo de esquema y al igual que en la topología en malla, si existiese algún tipo de falla en el enlace entre determinados nodos, esto no afectaría al resto, sin embargo, el rendimiento que se obtiene con esta configuración es inferior al de modo de infraestructura (Criollo Bustamante, 2010).

Modo Infraestructura (BSS, del inglés Service Set). En esta estructura el sistema está dividido en celdas o células conocidas como BSS que definen el área dentro de la cual un grupo de nodos se interconectan a través de un medio aéreo. Un AP hace las funciones de estación base pues tiene la capacidad de gestionar el tráfico que se genera en cada BSS y además se pueden comunicar con otras células, es por ello que a cada celda se le debe dotar de un AP que es finalmente el que las controle (Criollo Bustamante, 2010).

Conjunto de Servicios Extendidos (ESS, del inglés Extended Service Set). En esta estructura se pretende interconectar varios BSS a través de los AP, para lo cual son posibles dos tipos de configuraciones: una de ellas es la ESS con distribución inalámbrica donde la extensión de la red se consigue al hacer uso de un sistema de

distribución mediante cable de red y que es el medio que interconecta a las BSS y por otro lado se tiene la ESS con distribución inalámbrica, en este caso el sistema de distribución que interconecta las BSS es de naturaleza inalámbrica (Criollo Bustamante, 2010).

Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas no han sido diseñadas para sustituir a las redes cableadas sino más bien para complementarlas, puesto a que al ser tecnologías de diferentes características están pensadas para cubrir distintos segmentos de un sistema de comunicaciones de gran escala. Las redes inalámbricas permiten extender las redes de datos para ofrecer un mayor alcance y más fácil acceso a la red a los usuarios.

Ventajas de las Redes Inalámbricas. Las principales ventajas de las redes inalámbricas son:

- **Movilidad:** Permite a los usuarios desplazarse dentro del área de cobertura y mantener permanente conectividad a la red y acceder a sus recursos en tiempo real.
- **Flexibilidad:** Permite alcanzar lugares a donde la red cableada no puede llegar por inaccesibilidad del sitio donde se quiere desplegar.
- **Instalación Sencilla:** Al no requerir cables es muy fácil de implementar dentro de la red.
- **Costos Reducidos:** Las redes inalámbricas suponen un costo final reducido en comparación con las redes cableadas puesto que se elimina del presupuesto el valor de los medios cableados e instalación de los mismos.
- **Compatibilidad entre dispositivos:** Los dispositivos que utilizan la interfaz inalámbrica para el acceso a la red suelen estar estandarizados por organismos como la IEEE, lo que posibilita que exista compatibilidad entre los equipos.

- **Portabilidad:** Permite la integración a la red de dispositivos fáciles de transportar en todo momento debido a su reducido tamaño.
- **Escalabilidad:** Las configuraciones de una red inalámbrica se pueden cambiar con gran facilidad y permite el aumento de dispositivos (García Fernández et al., 2007).

Desventajas de las Redes Inalámbricas. Entre las desventajas más importantes de las redes inalámbricas se puede mencionar:

- **Velocidad:** Los medios inalámbricos suelen ofrecer menor velocidad de transmisión si se los compara con la conexión cableada, esto se debe a interferencias de distinta naturaleza que se origina en el ambiente donde operan.
- **Interferencias:** Las redes inalámbricas trabajan dentro de un rango de frecuencias establecido, por lo que pueden interferir con otros enlaces que trabajen en frecuencias similares.
- **Seguridad:** Debido a que utilizan como medio el aire el cual es compartido para todo tipo de comunicaciones de estas características, la información que viaja es vulnerable ya que las señales pueden ser receptadas por terceros a través de programas que capturan paquetes.
- **Factores ambientales:** La comunicación se puede ver afectada por las características del área donde se despliegue la red, así como condiciones climáticas las cuales son impredecibles e inevitables (García Fernández et al., 2007).

Redes Inalámbricas por su cobertura. Al igual que sucedía con las redes cableadas donde se las podía categorizar de acuerdo al área geográfica de cobertura, las redes inalámbricas se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

- *Wireless Personal Area Network (WPAN).*
- *Wireless Local Area Network (WLAN).*
- *Wireless Metropolitan Area Network (WMAN).*
- *Wireless Wide Area Network (WWAN).*

Redes De Área Local Inalámbrica (WLAN). Una WLAN comprende un sistema de comunicación de datos donde la transferencia de la información se realiza a través de ondas electromagnéticas donde el aire actúa como medio para la transmisión, de tal forma que se omite así la necesidad del uso de cables que de forma convencional se instalan en las redes LAN pero que en ocasiones suponen un problema para el acceso a los recursos debido a que la infraestructura del espacio donde se pretende llegar imposibilita la utilización de los mismos, además se agrega la flexibilidad y movilidad que caracteriza a las comunicaciones inalámbricas. Una WLAN está diseñada para dotar de servicio a lugares de extensión territorial de pocos metros, comúnmente entre 10 y 100 metros como puede ser un campus universitario, una residencia o un edificio (Huidobro, 2014).

Los comités de la IEEE (del inglés *Institute for Electrical and Electronics Engineers*) definen los estándares de las redes LAN bajo el nombre IEEE 802, es así que el estándar que define a las redes de área local inalámbrica; topologías, métodos de acceso, etc., es el IEEE 802.11 (Mero García, 2017).

El Estándar IEEE 802.11

IEEE 802.11 fue desarrollado por el grupo 11 del Comité IEEE y define el conjunto de normas para las redes WLAN donde la interconexión entre las estaciones transmisoras y receptoras se establece al utilizar el aire como medio de transmisión (Mero García, 2017) y permite dar cobertura dentro de áreas geográficas relativamente pequeñas.

Los sistemas IEEE 802.11 operan en las bandas no licenciadas ISM (del inglés *Industrial, Scientific and Medical*) definidas por el ITU-R, principalmente en las bandas de frecuencia de 2.4 y 5 GHz (Meden Peralta, 2013).

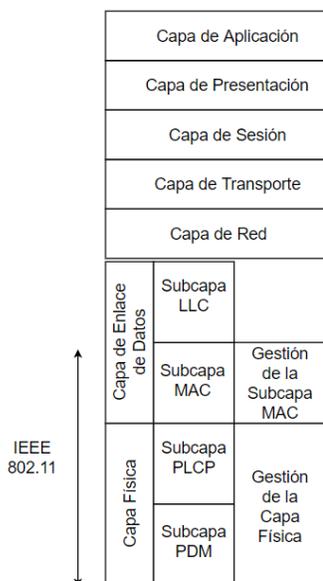
Capas Definidas por el Estándar IEEE 802.11

De forma general, los estándares de las redes LAN especifican las técnicas de modulación, rango de frecuencias, aspectos de QoS (López López, 2018) y el modelo de referencia de capas, de este último se tiene que todos los estándares IEEE 802 definen la primera capa y un sustrato de la capa de enlace de datos (capa 2) del modelo de OSI (del inglés *Open Systems Interconnection*) y estas son: la capa física y la subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC, del inglés *Medium Access Control*) (Mero García, 2017).

La Figura 2 muestra las capas del modelo de referencia OSI que define el estándar IEEE 802.11.

Figura 2

Capas definidas por el estándar IEEE 802.11 del Modelo de Referencia OSI



Capa Física. La capa física 802.11 se compone de dos subcapas: PLCP (del inglés *Physical Layer Convergence Protocol*) y PMD (del inglés *Physical Medium Dependent*).

PLCP (del inglés *Physical Layer Convergence Protocol*). La función que realiza este protocolo es adaptar los datos para que la capa física y subcapa MAC puedan comunicarse, de tal modo que se traduce el marco de la MAC (MPDU, del inglés *MAC Protocol Data Unit*) a un formato adecuado para ser transmitido (Naso, 2012).

PMD (del inglés *Physical Medium Dependent*). Su función principal es permitir la transmisión y recepción de la información entre las estaciones, además en esta subcapa se realiza el proceso de modulación e inverso de la señal en base a las características fijadas por el estándar (Naso, 2012).

El estándar IEEE 802.11 especifica los esquemas de codificación y transmisión. Los tres esquemas de transmisión más importantes definidos en este estándar son Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, del inglés *Direct Sequence Spread Spectrum*), también se define el Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS, del inglés *Frequency Hopping Spread Spectrum*), y finalmente la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (Salazar, 2016).

FHSS (del inglés Frequency Hopping Spread Spectrum)

El espectro ensanchado por salto de frecuencia es una técnica donde las señales se transmiten sobre una serie de frecuencias de forma aleatoria, de tal modo que se transmite una parte de la información sobre cierta frecuencia durante un intervalo de tiempo inferior a 400 ms y posteriormente se hace el salto a otra frecuencia, así cada tramo de la información se transmite en frecuencias distintas en intervalos de tiempo corto (López Barnés, 2008).

DSSS (del inglés Direct Sequence Spread Spectrum)

Esta técnica consiste en la generación de un patrón de bits redundante denominada como señal de chip la cual se relaciona con cada uno de los bits que conforman la señal de información. Para obtener la información original es necesario que en el lado de recepción se realice el proceso inverso (López Barnés, 2008).

El estándar IEEE 802.11 especifica para una secuencia de un total de 11 bits (10110111000) para representar un "1" y su complemento (01001000111) correspondiente al "0" (López López, 2018).

OFDM (del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales es una técnica que consiste en enviar varias señales de forma simultánea, pero en diferentes frecuencias (López López, 2018), sin embargo, para aplicar esta técnica es necesario un gran ancho de banda.

Este tipo de modulación elimina los problemas de interferencia intersimbólica (ISI, de inglés *intersymbol interference*) y de interferencia intercanal (ICI, del inglés *intercarrier interference*) (López Barnés, 2008).

Capa MAC (del inglés *Medium Access Control*). De acuerdo a Naso (2012):

La capa MAC es responsable de la gestión y control de los procedimientos de acceso a los canales, direccionamiento a la capa de enlace, comprobación de errores, fragmentación y reensamblaje de la trama. Cuando las estaciones estándar 802.11 comparten el mismo medio de transmisión existe la posibilidad de que se produzcan colisiones en caso de que dos o más estaciones transmiten al mismo tiempo. (p. 8)

La subcapa MAC conforma junto a la subcapa LLC (del inglés *Logical Link Control*) la capa de enlace de datos del modelo OSI y se ubica en la parte inferior de esta capa.

En IEEE 802.11 la arquitectura MAC se compone por dos funcionalidades estas son la Función de Coordinación Distribuida (DCF, del inglés *Distributed Coordination Function*) y la Función de Coordinación Puntual (PCF, del inglés *Point Coordinated Function*).

El término función de coordinación hace referencia a la función lógica que permite determinar el momento en que una estación dentro de la BSS está habilitada

para transmitir o recibir unidades de datos de protocolo a nivel MAC sobre el medio de comunicación compartido (Alvarez Marchán, 2013).

DCF (del inglés *Distributed Coordination Function*). DCF es el principal método de acceso al medio definido por el estándar IEEE 802.11 y opera en la modalidad *best-effort*, es decir, no se garantiza QoS (Alvarez Marchán, 2013). DCF basa su funcionamiento en técnicas de acceso aleatorias donde se produce una contienda por apoderarse del medio. El tráfico que transita por los enlaces en este mecanismo es de tipo asíncrono ya que en esta clase de técnicas se generan retardos aleatorios no predecibles (Oliver & Escudero, 1999).

DCF basa su funcionamiento en el esquema CSMA/CA (del inglés *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) que consiste en escuchar el canal antes de iniciar la transmisión y se usa durante el Periodo de Contención (CP, del inglés *Contention Period*).

Como ya se ha mencionado, cualquier estación que requiera transmitir información debe entrar en un proceso de contienda por el canal para lo cual la estación debe sensor el canal con el fin de comprobar si otra estación también transmite en ese momento, si el canal está ocupado debe esperar, una vez que por el canal no se genere tráfico por un periodo de tiempo fijo llamado DIFS (del inglés *DCF InterFrame Spacing*) entonces la estación puede iniciar la transmisión (Naso, 2012).

PCF (del inglés *Point Coordinated Function*). Este servicio se caracteriza por tener una función de coordinación centralizada, en esta funcionalidad se tiene la presencia de un nodo conocido como Punto Coordinador (PC del inglés *Coordinador Point*) que normalmente es el AP y es el que controla el acceso al medio. El PC realiza

un sondeo periódico a cada una de las estaciones y de entre estas solo aquella que envía el paquete de sondeo está habilitada para transmitir los datos (Naso, 2012).

El PCF otorga a cada estación un turno para transmitir en un momento predeterminado, con lo que se garantiza un retraso máximo y debido a que solo puede transmitir una estación a la vez, se eliminan las colisiones de paquetes (Ortiz Puga, 2015).

Enmiendas IEEE 802.11

Desde su aparición el estándar IEEE 802.11 ha recibido enmiendas las cuales han permitido ofrecer un mejor servicio en comparación con versiones anteriores, con el objetivo de preservar la interoperabilidad entre estas. (López López, 2018).

Existen distintas versiones del estándar IEEE 802.11, sin embargo, muchas de ellas constituyen correcciones, actualizaciones o extensiones de las versiones estandarizadas. A continuación, se mencionan las principales enmiendas previo a la aparición del estándar IEEE 802.11ac.

- **IEEE 802.11:** Es la versión original del estándar, la misma opera en la banda de 2.4 GHz y define velocidades teóricas entre 1 y 2 Mbps, utiliza un esquema de transmisión FHSS y define el protocolo CSMA/CA Este estándar no permite interoperabilidad con los estándares 802.11b y 802.11g
- **IEEE 802.11a:** Se utiliza en la banda de 5GHz y establece velocidades teóricas de hasta 54 Mbps, además emplea una codificación OFDM y emplea una modulación 64 QAM, tiene 12 canales no solapados entre los cuales 8 se utilizan para la red inalámbrica y los 4 restantes para conexiones punto a punto. Este estándar no permite interoperabilidad con 802.11b.

- **IEEE 802.11b:** Su funcionamiento se establece en la banda de 2.4 GHz y en condiciones ideales permitiría alcanzar velocidades de hasta 11 Mbps, sin embargo, también puede operar a velocidades de 5.5 Mbps, 2 Mbps o 1 Mbps sino se dan tales condiciones. Este estándar utiliza como método de acceso CSMA/CA y esquema de transmisión DSSS.
- **IEEE 802.11g:** Los dispositivos basados en este estándar operan en la banda de 2.4 GHz, se utiliza una codificación OFDM y además se ofrece una velocidad máxima teórica de 54 Mbps. Esta enmienda ha tenido una gran aceptación debido a la interoperabilidad que tiene con 802.11b.
- **802.11n:** Trabaja en las bandas ISM de 2.4 y 5 GHz con canales de 40 MHz y una modulación 64 QAM, con esto se logra una velocidad máxima de 600 Mbps. En esta versión se introduce el concepto de MIMO (del inglés *Multiple Input Multiple Output*) que se basa en utilizar múltiples antenas en los transmisores y receptores con lo que se pretende aumentar la tasa de transferencia. Los dispositivos que integran 802.11n son compatibles con todas las enmiendas anteriores al trabajar en ambas bandas de frecuencia (López López, 2018).

El Estándar IEEE 802.11ac

El estándar IEEE 802.11ac también conocido como WiFi 5 o WiFi Gigabit fue desarrollado por el Grupo de Tareas (TGac, del inglés *Task Group*). A diferencia de su antecesor que desarrolló técnicas nuevas para obtener un mejor rendimiento, WiFi Gigabit utiliza y ofrece mejoras a las técnicas ya existentes, de modo que se garantiza la compatibilidad con sus predecesores y determina los parámetros del estándar en las fases Wave 1 y Wave 2 (Llugsí et al., 2017). Fue lanzado en el año 2012 y finalizó en 2013.

La enmienda 802.11ac indica que los dispositivos compatibles operan en la banda de los 5 GHz que al ser menos usada que la de 2.4 GHz ofrece canales con menor interferencia con lo que se consigue una conexión más estable y con mayores velocidades al existir la posibilidad de usar anchos de banda de canal más grandes, de modo que en escenarios ideales se puede alcanzar una tasa de transferencia por encima de los 1 Gbps.

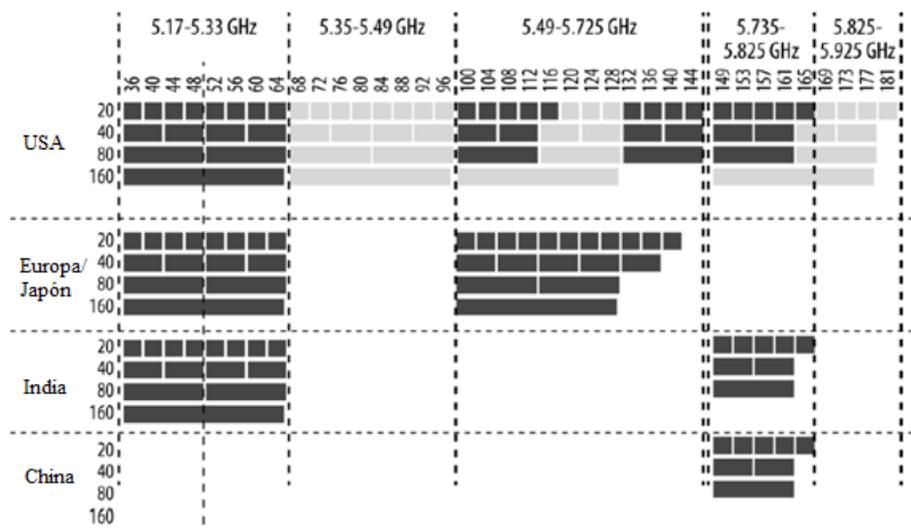
La evolución que ha tenido este estándar con respecto a versiones anteriores se ha conseguido gracias a la combinación de varias tecnologías, mismas que se detallan a continuación.

Canales en el Estándar IEEE 802.11ac. En enmiendas pasadas, los anchos de banda del canal usualmente utilizados son de 20 y 40 MHz, mientras que el estándar IEEE 802.11ac añade dos anchos de banda de canal extra: 80 y 160 MHz. Los dispositivos que operan con estándar admiten canales de 20, 40 y 80 MHz de forma mandatoria y 160 MHz opcionalmente (López López, 2018). Para el ancho de banda de 80 MHz se utilizan 2 canales adyacentes de 40 MHz mismos que se forman por dos bandas contiguas de 20 MHz, mientras que para los canales de 160 MHz y dado el limitado tamaño del espectro se puede usar un solo bloque contiguo o dos bloques no contiguos de 80 MHz, usualmente referido como 80 + 80 MHz (Herrera Herrera, 2018).

En la Figura 3 se muestra un esquema de los canales asignados para la banda de 5 GHz con los distintos tamaños de ancho de banda permitidos para operar en distintas regiones del mundo.

Figura 3

Canales disponibles en distintas regiones del mundo para el Estándar IEEE 802.11ac



Nota, Tomado de Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar 802.11ac (p. 25), por Vicente Jaramillo, 2015.

Tecnología MIMO (del inglés Multiple-Input Multiple-Output). La tecnología MIMO hace referencia al uso de múltiples señales que se transmiten a la misma frecuencia de forma simultánea, beneficiándose de la propagación multicamino con el fin de aumentar la eficiencia espectral del sistema inalámbrico y así ofrecer mayores tasas de transferencia y admitir un mayor número de usuarios sin aumentar la potencia y ancho de banda (López López, 2018).

El funcionamiento de esta tecnología consiste en segmentar el flujo de datos en fragmentos de menor tamaño a los que se les denomina flujos espaciales, los mismos transportan datos independientemente del resto de flujos y se envían simultáneamente a través de diferentes antenas (Mero García, 2017), es por ello que la implementación de MIMO requiere la integración de múltiples antenas en ambos lados de la transmisión.

El estándar IEEE 802.11n integra la tecnología MIMO del tipo SU-MIMO (del inglés *Single User Multiple Input Multiple Output*) en el cual se pueden transmitir varios flujos con la condición de que sea entre un solo emisor y un único receptor. Se permite el uso de hasta 4 flujos espaciales.

Tecnología MU-MIMO (del inglés Multi-User Multiple-Input Multiple-Output).

El estándar IEEE 802.11ac integra la tecnología MU-MIMO para Wave 2 también conocida como MIMO de múltiples usuarios.

La tecnología MU-MIMO permite a un AP enviar varios segmentos de datos a varios usuarios a la vez y a la misma frecuencia (Ortiz Puga, 2015). Al transmitirse flujos de datos independientes a varios clientes se puede obtener un total de cuatro receptores cada uno con dos antenas servidos por un AP de ocho antenas, es decir se envían dos flujos espaciales a cada estación (Mero García, 2017).

La tecnología MU-MIMO demanda la optimización de *beamforming*, técnica que permite dirigir la energía de la señal a una dirección específica, lo cual permite una mayor robustez a la interferencia en la comunicación (Mero García, 2017).

Es importante destacar que para aprovechar las capacidades de la tecnología MU-MIMO no solo el AP debe integrarla, sino también los dispositivos clientes que implementen una tarjeta de red basada en la segunda fase de este estándar.

Intervalo de Guarda (GI, del inglés Guard Interval). Este estándar posee la característica de tener la capacidad de elegir un intervalo de guarda OFDM acortado, mismo que se reduce de 800 ns a 400 ns, esto genera un aumento del 10% en el rendimiento. Para poder beneficiarse de esta característica tanto el transmisor como el receptor deben tener la capacidad de procesar este intervalo de guarda corto (SGI, del inglés *Short Guard Interval*) (López López, 2018).

Flujos Espaciales. El estándar IEEE 802.11ac define el uso de un flujo espacial de manera obligatoria y siete flujos más opcionalmente, en consecuencia, se permitiría hasta 4 transmisiones MU-MIMO simultáneas (Vicente Jaramillo, 2015). En la actualidad existen equipos que soportan hasta tres flujos espaciales y para la siguiente fase se espera la extensión de hasta cuatro flujos espaciales.

Esquemas de Modulación y Codificación (MCS, del inglés Modulation and Coding Schemes). El orden en la modulación y codificación definen el índice de MCS y el estándar IEEE 802.11ac admite el uso 10 índices de MCS, donde los primeros 8 índices son obligatorios mientras los dos restantes son de uso opcional (Llugsi et al., 2017). El índice de MCS mantiene una estrecha relación con el ancho del canal y la intensidad de señal recibida. En la Tabla 1 se presenta la intensidad de señal mínima requerida en función del índice de MCS y el ancho de banda del canal.

Tabla 1

Sensibilidad mínima en el receptor

Índice MCS	Modulación	Tasa de Código	20 MHz (dBm)	40 MHz (dBm)	80 MHz (dBm)	160 MHz (dBm)
0	BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73
1	QPSK	1/2	-79	-76	-73	-70
2	QPSK	3/4	-77	-74	-71	-68
3	16-QAM	1/2	-74	-71	-68	-65
4	16-QAM	3/4	-70	-67	-64	-61
5	64-QAM	2/3	-66	-63	-60	-57
6	64-QAM	3/4	-65	-62	-59	-56
7	64-QAM	5/6	-64	-61	-58	-55

Índice MCS	Modulación	Tasa de Código	20 MHz (dBm)	40 MHz (dBm)	80 MHz (dBm)	160 MHz (dBm)
8	256-QAM	3/4	-59	-56	-53	-50
9	256-QAM	5/6	-57	-54	-51	-48

Nota, Tomado de *IEEE 802.11n/ac Data Rates under Power Constraints* (p. 3), por Daldoul et al., 2018.

Modulación 256 QAM. El estándar IEEE 802.11n admite una modulación hasta 64-QAM, mientras que WiFi 5 permite 256-QAM, con esto se pasa de 8 cambios de fase y 8 niveles de amplitud (constelación 8x8) a 16 en cada uno (constelación 16x16). Este incremento en el orden de la modulación implica que en lugar de transmitir 6 bits en cada subportadora en el canal se pueda transmitir 8 bits, esto supone un incremento del 33% en la velocidad al compararlo con el estándar anterior (López López, 2018).

Velocidad de Datos. En el estándar IEEE 802.11ac se presenta un incremento en las tasas de datos respecto a estándares anteriores. La velocidad está dada por el ancho de banda, el índice de MCS, el número de flujos espaciales y el intervalo de guarda (Daldoul et al., 2018).

La Tabla 2 muestra las velocidades alcanzadas por el estándar IEEE 802.11ac para uno y dos flujos espaciales y un ancho de banda de 80 MHz de acuerdo a los parámetros requeridos para los escenarios de prueba.

Tabla 2

Velocidades del estándar IEEE 802.11ac de acuerdo al número de flujos espaciales y ancho de banda de canal

Índice MCS	Flujos Espaciales	80 MHz (Mbps)		Flujos Espaciales	80 MHz (Mbps)	
		No SGI	SGI		No SGI	SGI
0	1	29.3	32.5	2	58.5	65
1	1	58.5	65	2	117	130
2	1	87.8	97.5	2	175.5	195
3	1	117	130	2	234	260
4	1	175.5	195	2	351	390
5	1	234	260	2	468	520
6	1	263.3	292.5	2	526.5	585
7	1	292.5	325	2	585	650
8	1	351	390	2	702	780
9	1	390	433.3	2	780	866.7

Nota, Adaptado de IEEE 802.11n/ac Data Rates under Power Constraints (p. 3), por Daldoul et al., 2018.

IEEE 802.11ac Wave 1 y Wave 2

El estándar IEEE 802.11ac define dos variantes denominadas Wave. Wave 1 comprende la primera fase y se caracteriza por ofrecer velocidades máximas de hasta 433.3 Mbps con el uso de un flujo y con un ancho de banda de canal de 80 MHz, por otro lado, Wave 2 correspondiente a la segunda fase permitiría alcanzar velocidades de hasta 866.7 Mbps con el uso de dos flujos y 80 MHz de ancho de banda del canal.

La principal diferencia entre las dos fases Wave radica en la integración de la tecnología MU-MIMO para la fase Wave 2, sin embargo, aún no existe un amplio catálogo de equipos en el mercado que integren las especificaciones de esta fase del estándar IEEE 802.11ac.

En la Tabla 3 se presentan las principales características de las dos fases del estándar IEEE 802.11ac.

Tabla 3

Especificaciones de las fases Wave del Estándar IEEE 802.11ac

Parámetro	802.11ac Wave 1	802.11ac Wave 2
Banda de Frecuencia	5 GHz	5 GHz
MIMO	Single User (SU)	Multi User (MU)
Ancho de banda (MHz)	20, 40, 80	20, 40, 80, 80+80, 160
Modulación	256 QAM	256 QAM
Flujos Espaciales	3	3-4

Nota, Adaptado de Estudio, Pruebas y Simulación del Estándar IEEE 802.11ac

Basándose en MU-MIMO (MIMO Multiuser) (p. 264), por Llugsí et al., 2017.

Interferencias

La interferencia constituye un proceso donde se altera o destruye una señal en algún punto de su trayecto en el canal de transmisión entre el transmisor y el receptor (Ramón Ramírez, 2015).

Las interferencias afectan directamente el rendimiento de cualquier red. Cuando se refiere a redes inalámbricas existen dos tipos de interferencias que degradan la calidad del servicio, las mismas se describen a continuación.

Interferencia Co-Canal. Este tipo de interferencia se origina cuando varios dispositivos utilizan el mismo canal radioeléctrico de modo que la calidad de la señal se ve afectada (Ramón Ramirez, 2015). El efecto de la interferencia co-canal puede ser mayor o menor, esto depende de la distancia entre celdas y del número de celdas existentes en un área determinada (Scricca Yanes, 2013). Una mayor distancia entre celdas ofrece cierto aislamiento de cada celda con el resto, si existiese un gran número de celdas la separación entre celdas que operan en la misma frecuencia es por ende menor, es por ello que las redes que integran muchas celdas co-canal se ven mayormente afectadas por este fenómeno.

Interferencia de Canal Adyacente. Este tipo de interferencias se originan cuando las señales de canales contiguos se solapan en la frecuencia de un canal determinado. Para reducir el efecto de estas interferencias se debe establecer una canalización adecuada y además mejorar los sistemas de filtrado tanto en los transmisores como receptores (Scricca Yanes, 2013).

Tecnología WiFi

WiFi es una marca perteneciente y licenciada por la Wi-Fi Alliance, ente comercial encargado de probar, adoptar y certificar a aquellos productos que cumplen los requerimientos definidos por el estándar IEEE 802.11 (López Barnés, 2008), es decir WiFi no es más que una de varias posibles aplicaciones basadas en el estándar inalámbrico el cual determina las características de operación sobre las cuales se debe regir la tecnología WiFi o cualquier otra basada en el estándar (Escudero Pascual, 2007). El objetivo de la WiFi Alliance es garantizar la interoperabilidad de todos aquellos dispositivos que cuenten con el sello WiFi (*WiFi CERTIFIED*) independientemente del fabricante que los comercialice.

Calidad de Servicio (QoS)

La calidad de servicio se define como el rendimiento de extremo a extremo de los servicios de red. Existen parámetros asociados a QoS que permiten determinar si el rendimiento de la red es el esperado o no. Los parámetros de QoS son: retardo, variación del retardo, paquetes perdidos y *throughput* (Cano D. & Almeida G., 2012).

Retardo (Delay). También conocido como *delay* o latencia, se define como la cantidad de tiempo que un paquete tarda en llegar desde el momento en que se transmite desde el origen hasta llegar a su destino.

Existen tres factores que afectan al retardo, estos son: la distancia entre el transmisor y el receptor, el tamaño de los paquetes y el número de redes entre los terminales (Cano D. & Almeida G., 2012).

Variación del Retardo (Jitter). Se refiere a la variación de la latencia que se da entre cada llegada de los paquetes transmitidos, es decir el tiempo que demora cada paquete en llegar al receptor. Los valores bajos de *jitter* usualmente no afectan de manera significativa a QoS, sin embargo, los valores altos de este parámetro indican una variación muy alta en el flujo de datos, lo cual afecta directamente el rendimiento de la red (Cano D. & Almeida G., 2012).

Paquetes Perdidos (Packet Loss). La pérdida de paquetes se da una vez que el tiempo de espera en la recepción se agota, esto se debe a que usualmente los recursos en las redes WLAN son compartidos, esto genera que existan colas de paquetes, interferencia entre canales, competencia por el acceso al canal entre otros (Cano D. & Almeida G., 2012).

Otro aspecto que afecta el número de paquetes perdidos es el protocolo de capa de transporte ya que al utilizar TCP (del inglés *Transmission Control Protocol*) los

paquetes que no llegan al destino son retransmitidos hasta que sean recibidos, por otro lado, el protocolo UDP (del inglés *User Datagram Protocol*) descarta aquellos paquetes que no se reciben, con lo que existe pérdida de paquetes (Cano D. & Almeida G., 2012). El porcentaje de paquetes perdidos máximo permitido y adecuado para la transmisión de datos corresponde al 5% o menos (Zapata Rodríguez et al., 2017).

Throughput. El *throughput* se puede interpretar como el volumen de datos real que circula en la red, este parámetro tiene una estrecha relación con el ancho de banda, la tasa de transmisión y cantidad de usuarios. En pocas palabras se puede decir que el *throughput* es el rendimiento de la red, dado por la cantidad de bits por unidad de tiempo transmitidos (Cano D. & Almeida G., 2012).

Protocolo NTP

El protocolo NTP (del inglés *Network Time Protocol*) se fundamenta en el protocolo de capa 3 IP (del inglés *Internet Protocol*) y de capa 4 UDP, mismos que permiten un mecanismo de transporte sin conexión (Mills, 1991). Este protocolo es utilizado para la sincronización de tiempo y rutas de transmisión en redes de latencia variable. El objetivo de este protocolo es sincronizar los equipos de una red en el orden de los milisegundos.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

Para la implementación de los escenarios planteados es necesario disponer con el equipamiento adecuado que permita levantar las redes propuestas, así se garantiza que dichas redes operen bajo el estándar IEEE 802.11ac en sus dos fases Wave, así como también las herramientas de software con las que sea posible realizar la inundación de tráfico y extraer de datos de interés. El presente capítulo se centra en detallar los materiales y métodos utilizados para la implementación de la red.

Materiales

De acuerdo a los escenarios propuestos, la red está constituida por dos PC portátiles suscriptoras, un router que funciona en modo AP y dos routers que son los que generan las interferencias. En base a lo explicado anteriormente, es necesario que las tarjetas de interface de red que integran las portátiles sean compatibles con el estándar IEEE 802.11ac, de igual manera se ha seleccionado tres routers de la marca TP-Link que funcionen bajo este estándar inalámbrico. Las características de todos estos equipos se describen a continuación.

Routers Inalámbricos. Los routers que se han escogido pertenecen a la serie Archer de la marca TP-Link, esto debido a que en el mercado nacional son fáciles de adquirir gracias a la popularidad del catálogo de productos de esta marca los cuales se utilizan muy comúnmente en redes domésticas. Para el AP se eligió el modelo Archer C6U AC1200. Para la selección de este dispositivo se toman como principales consideraciones que este pueda funcionar en el modo de AP y sea compatible con la tecnología MU-MIMO, por otro lado se eligió para los dos routers vecinos el modelo

Archer C60 AC 1350. A continuación, se presentan las características más relevantes de estos dispositivos.

Características del Router Archer C6U AC1200. La Tabla 4 muestra un resumen de las principales características que integra este router. Además en la Figura 4 se presenta el router inalámbrico utilizado. En el Anexo 1 apartado A se encuentra la Hoja Técnica de este equipo y el *Test Report* se ubica en el apartado B, donde se indican la potencia de transmisión y sensibilidad de las antenas.

Tabla 4

Características del Router Archer C6U AC1200

Parámetro	Especificación
Estándar	IEEE 802.11a/n/ac en 5 GHz IEEE 802.11n/b/g en 2,4 GHz
Canales	36, 40 44, 48
Anchos de Banda de Canal (MHz)	20, 40, 80
MU-MIMO	SI
SGI	SI
Potencia de Tx 5GHz (dBm)	<30
Sensibilidad Rx 5GHz (dBm)	11ac HT20 mcs8:-69
	11ac HT40 mcs9:-65
	11ac HT80 mcs9:-62
Flujos Espaciales	MU-MIMO 2x2
Velocidad (Mbps)	5 GHz: 867 (802.11ac)
	2,4 GHz: 300 (802.11n)
Puertos Ethernet	LAN: 4x [10/100/1000M (RJ45)]

Parámetro	Especificación
	WAN: 1x 10/100/1000BaseTX (RJ45)
Modos	Router Punto de Acceso

Figura 4

Router Archer C6U AC1200



Características del Router Archer C60 AC1350. La Tabla 5 muestra un resumen de las principales características que integran los routers que actuarán como vecinos. Por otro lado en la Figura 5 se muestra una vista del router utilizado. En el Anexo 1 apartado C se presenta la Hoja Técnica del router.

Tabla 5

Características del Router Archer C60 AC1350

Parámetro	Especificación
Estándar	IEEE 802.11ac/n/a 5 GHz IEEE 802.11n/b/g 2,4 GHz
Bandas de Frecuencia (GHz)	2.4 y 5

Parámetro	Especificación
Canales	36, 40 44, 48
Anchos de Banda de Canal (MHz)	20, 40, 80
Antenas	3 en la banda de 2.4 GHz 2 en la banda de 5 GHz
MU-MIMO	SI
Potencia de Tx 5GHz (dBm)	<27
Sensibilidad Rx 5GHz (dBm)	11ac VHT20: -71 11ac VHT40: -66 11ac VHT80: -62
Flujos Espaciales	MU-MIMO
Velocidad	5 GHz: 867 Mbps (802.11ac) 2,4 GHz: 450 Mbps (802.11n)
Puertos Ethernet	LAN: 4x 10/100 Mbps WAN: 1x 10/100/1000 Mbps
Modos	Router Punto de Acceso

Figura 5

Router Archer C60 AC1350



GUI de Configuración de Routers TP-Link. La marca de dispositivos TP-Link ofrece interfaces de administración para sus equipos tanto basada en la web como a través de la aplicación móvil Tether, donde se pueden configurar distintos parámetros de la red, entre ellos se encuentra el apartado de configuración de la red inalámbrica.

Los parámetros que se pueden configurar en la red inalámbrica están relacionados por un lado a aspectos administrativos y de seguridad mientras que por otro lado se tiene la capacidad de elegir aspectos como el estándar sobre el cual van a operar los dispositivos, así como canales, anchos de banda de canal y potencia de transmisión para las bandas de 2.4 y 5 GHz. Esto permite la configuración de dichos parámetros de acuerdo a las características que requieren los escenarios planteados.

Para el presente proyecto de investigación se utiliza la GUI basada en la web de TP-Link debido a que es de fácil acceso y no requiere la conexión a Internet por parte de los routers además esta conexión puede ser cableada o inalámbrica.

La Figura 6 muestra la GUI de administración para los routers de la marca TP-Link

Figura 6

GUI web para configuración de equipos TP-Link

The image shows the TP-Link web configuration interface. The top navigation bar includes the TP-Link logo, tabs for 'Configuración Rápida', 'Básica', and 'Avanzada', a language dropdown set to 'Español', and buttons for 'Salir' and 'Reiniciar'. The left sidebar contains a menu with options: 'Estado', 'Red', 'Modo de Operación', 'Red Inalámbrica' (highlighted in yellow), 'Red de Invitados', 'Compartición USB', 'Control Parental', and 'QoS'. The main content area is titled 'Configuración inalámbrica' and shows settings for the 2.4GHz and 5GHz bands. The 'Activar red inalámbrica' checkbox is checked. The SSID is 'TP-Link_519E_5G' with an 'Ocultar SSID' option. Security is set to 'WPA/WPA2 - Personal (Recomendado)'. The version is 'Auto', and encryption is 'Auto'. The password is '48506472'. The mode is '802.11n/ac mixto', channel width is '80MHz', and channel is '44'. Transmission power is set to 'Alto'. There are checkboxes for 'Habilitar Airtime Fairness' and 'Habilitar Multi-User MIMO'. A note at the bottom states: 'Nota: Para utilizar esta funcionalidad, necesitará tener un adaptador de red que soporte Multi-User MIMO.' A 'Guardar' button is located at the bottom right.

PC Portátiles y Tarjetas de Interface de Red. Para las estaciones suscriptoras se dispone de dos PC portátiles de las marcas Asus y Lenovo, las cuales integran tarjetas de red del fabricante Intel, de forma concreta los modelos Dual Band Wireless-AC 7265 y Wireless-AC 9462 respectivamente. Es importante que estas tarjetas tengan soporte para el sistema operativo Linux puesto a que se trabaja con el mismo para realizar las inyecciones de tráfico. A continuación, se detalla las características técnicas más relevantes tanto de las PC portátiles como de las tarjetas de interfaz de red (NIC, del inglés *Network Interface Card*) que integran.

Características PC portátiles. La Tabla 6 muestra un resumen de las principales características de las PC portátiles que son usadas como estaciones suscriptoras.

Tabla 6*Características PC portátiles*

Parámetro	PC1	PC2
Marca	Asus	Lenovo
Modelo	RoG G501VW	IdeaPad S340
Procesador	Intel Core i7 2.6 GHz	Intel Core i7
Memoria RAM	8 GB	8 GB
Sistema Operativo	Ubuntu 18.04.4/64bits	Ubuntu 18.04.4/64bits
NIC	Intel® Wireless-AC 7265 doble banda	Intel® Wireless-AC 9560

Características Tarjeta de Red Intel Dual Band Wireless-AC 7265. La Tabla 7 muestra un resumen de las principales características de esta NIC. En el Anexo 1 apartado D se encuentra la Hoja Técnica del router y en el apartado E presenta el *Test Report* del mismo.

Tabla 7*Características NIC Dual Band Wireless-AC 7265*

Parámetro	Especificación
	IEEE 802.11a/b/g/n
Estándar	IEEE 802.11ac
	IEEE 802.11d/e/i/h/w
Bandas de Frecuencia (GHz)	2.4 y 5
Velocidad Máxima (Mbps)	867
MU-MIMO	No

Parámetro	Especificación
Sistemas Operativos Compatibles	Windows
	Linux
	Chrome OS

Características Tarjeta de Red Intel Wireless-AC 9462. En la Tabla 8 se presenta un resumen de las principales características de esta NIC. En el Anexo 1 apartado F se presenta la Hoja Técnica, mientras que en el apartado G se encuentra el *Test Report*.

Tabla 8

Características NIC Wireless-AC 9264

Parámetro	Especificación
Estándar	IEEE 802.11a/b/g/n
	IEEE 802.11ac
	IEEE 802.11d/e/i/h/w/r/k/v
Bandas de Frecuencia (GHz)	2.4 y 5
Velocidad Máxima (Mbps)	433
MU-MIMO	Si
Sistemas Operativos compatibles	Windows
	Linux

Sistema Operativo Ubuntu. Ubuntu constituye una distribución basada en Debian de Linux, el cual caracteriza por ser un sistema operativo de software libre y código abierto capaz de ejecutarse sobre PC de escritorio y servidores.

Debido a que las distintas versiones de Ubuntu son de fácil acceso ya que son gratuitas y están disponibles en su página web, se puede elegir entre cualquiera de ellas para ser instalada en los PC portátiles. Se ha elegido la versión 18.04 LTS (del inglés *Long Term Support*) de este sistema operativo debido a que es una de sus más recientes versiones y permite la instalación de las herramientas de software que son requeridas, además las versiones LTS de Ubuntu son más estables que otras y ofrecen soporte a largo plazo tal como indica su nombre.

Para la instalación del sistema operativo elegido se realizó particiones a los discos de ambas portátiles, para lo cual se reserva un espacio de entre 60 y 80 GB de memoria ROM.

Herramientas para la Inyección de Tráfico. Existen diferentes herramientas de software que son capaces de generar tráfico y con las cuales es posible medir las métricas de desempeño, algunas de ellas son D-ITG, iPERF, jPERF, Rude/Crude, etc. Cada una de estas herramientas presentan ciertas características que las diferencian del resto, por lo que de acuerdo a un análisis de dichas características se ha elegido la que más se adecua a las necesidades que se tiene.

En el presente proyecto de investigación se propone como herramienta para la inyección de tráfico la plataforma D-ITG, debido a que esta presenta varias características que suponen una ventaja de acuerdo a los objetivos planteados, como por ejemplo el hecho de contar con una interfaz gráfica que permite interactuar de una manera más amigable con esta herramienta, tener la capacidad de generar tráfico basado en los protocolos de transporte TCP y UDP, permitir el almacenamiento de ficheros con la información de las inyecciones realizadas y principalmente que entrega directamente los valores de las métricas de desempeño *delay*, *throughput*, *jitter* y paquetes perdidos.

D-ITG. La herramienta D-ITG es un *software* de distribución libre que utiliza la técnica intrusiva de inyección de tráfico a nivel de paquetes con la cual se puede hacer una medición de la red y obtener las métricas de desempeño ya mencionadas anteriormente.

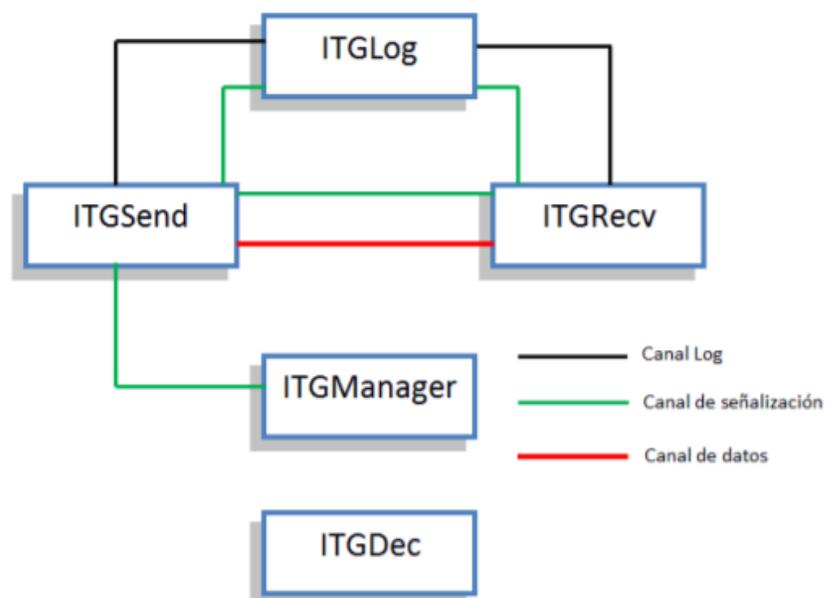
D-ITG puede generar tráfico de IPv4 y soporta varios protocolos, mismos que pueden ser generados a nivel de las capas de red, transporte y aplicación. Para la comunicación entre el emisor y receptor se utiliza un canal de señalización independiente del canal de datos que trabaja con el protocolo TSP (del inglés *Traffic Specification Protocol*) (Cano D. & Almeida G., 2012).

Una característica de este software es la capacidad de generar ficheros con la información de las inyecciones de tráfico realizadas misma que puede ser almacenada en el transmisor o receptor, además existe la posibilidad de utilizar programas como GNUPlot o Matlab para obtener gráficas de los parámetros de QoS a partir de los archivos generados por D-ITG.

Arquitectura de D-ITG. El software D-ITG utiliza un modelo cliente-servidor y su arquitectura se forma a través de varios bloques distribuidos (Cano D. & Almeida G., 2012). La Figura 7 muestra la relación entre los bloques que conforman esta plataforma, estos son: ITGSend ITGRecv, ITGLog e ITGDec.

Figura 7

Arquitectura D-ITG



Nota, Tomado de Análisis del desempeño de una red con tecnología Wi-Fi para largas distancias en la región costa del Ecuador (p. 75), por Cano D. & Almeida G., 2012.

- **ITGSend:** Este bloque se encarga de generar los paquetes para la transmisión y puede operar en 3 modos:
 - Modo flujo único: Un único canal es responsable de la generación de un solo flujo y del manejo de la señal.
 - Modo flujo múltiple: Se genera un grupo de flujos, que trabaja como aplicación multiproceso, uno de los canales se encarga de la generación de flujo de tráfico mientras que el otro se ocupa de guiar el proceso al implementar el protocolo TSP.
 - Modo Daemon: En este modo el bloque ITGManager controla de forma remota al componente de transmisión.

- **ITGRecv:** Su funcionamiento se centra en recibir el tráfico que puede ser generado por una o más instancias ITGSend. Este bloque escucha si existen nuevas conexiones TSP de forma permanente y cuando existe una solicitud para la conexión ITGRecv genera un nuevo segmento por cada flujo que se encarga de gestionar la comunicación con el transmisor.
- **ITGLog:** Es un servidor de registro que utiliza un protocolo de señalización para la entrada y salida al mismo, su función es recibir y almacenar la información del receptor y transmisor, esta información puede ser enviada a través de los protocolos TCP y UDP.
- **ITGDec:** En este bloque se decodifica la información generada en los *logs* del ITGSend e ITGRecv de modo que se pueda analizar los datos obtenidos (Cano D. & Almeida G., 2012).

Métodos

Sincronización de Relojes. Un factor muy importante dentro de las redes es la sincronización de relojes, que implica conseguir que los dispositivos de la red operen a una señal de reloj lo más idéntica posible en frecuencia y fase. Esto permite que a la hora de realizar las inyecciones de tráfico no se obtengan valores negativos de *delay*.

En la red implementada tanto el equipo transmisor como el receptor deben tener sincronizados sus relojes internos. Esta sincronización se la realiza a través del protocolo NTP. En este caso las redes que se proponen no tienen conexión a Internet por lo que se ve necesario la creación de un servidor propio para sincronizar a los equipos, como se explica en (Fernandez & Lara-Cueva, 2016).

Asignación de Canales. Para la asignación de canales se tiene en consideración que se trabaja con dos escenarios: en el primero se tiene una red donde no existen interferencias por efectos de solapamiento entre canales, ni de tipo co-canal

ni por canal adyacente, mientras que en el segundo escenario se tiene una red interferida del tipo co-canal, donde los routers operan en el mismo canal y con un mismo ancho de banda de canal.

Escenario no Interferido. En este escenario se asignó el canal 44 al router AP, mientras que los routers que actúan como vecinos no entran en operación. Ya que se establece un ancho de banda de canal de 80 MHz de operación para el equipo, la red utiliza los canales adyacentes 36, 40, 44, 48.

Escenario Interferido. Para este escenario al igual que en el primero se asigna el canal 44 al AP y además se configura a los routers vecinos para que también operen en este canal y con el mismo ancho de banda.

Determinación de la Capacidad Máxima del Canal. Un aspecto determinante previo a la obtención de las métricas de QoS, es identificar la capacidad máxima del canal. Para esto se deben realizar varias inyecciones de tráfico en un escenario sin obstáculos. Inicialmente se considera una distancia mínima entre los equipos y se toma como referencia la tasa máxima de transmisión teórica que ofrece el fabricante TP-Link en el Estándar IEEE 802.11ac de 433 Mbps para un flujo y 867 Mbps para dos flujos, de modo que se inunde el canal, entonces la tasa varía en cada una de las inyecciones hasta obtener un porcentaje de paquetes perdidos inferior al 5%. En las inyecciones se utiliza como protocolo de transporte el protocolo UDP debido que al ser del tipo No Orientado a la Conexión no garantiza la entrega de paquetes, lo cual es justamente lo que se requiere evidenciar. Una vez identificada la cantidad de paquetes óptima se procede a realizar las inyecciones en los escenarios propuestos.

Escaneo de la red 5GHz. Un aspecto importante dentro de la implementación de la red en los diferentes escenarios propuestos, es determinar si existen redes

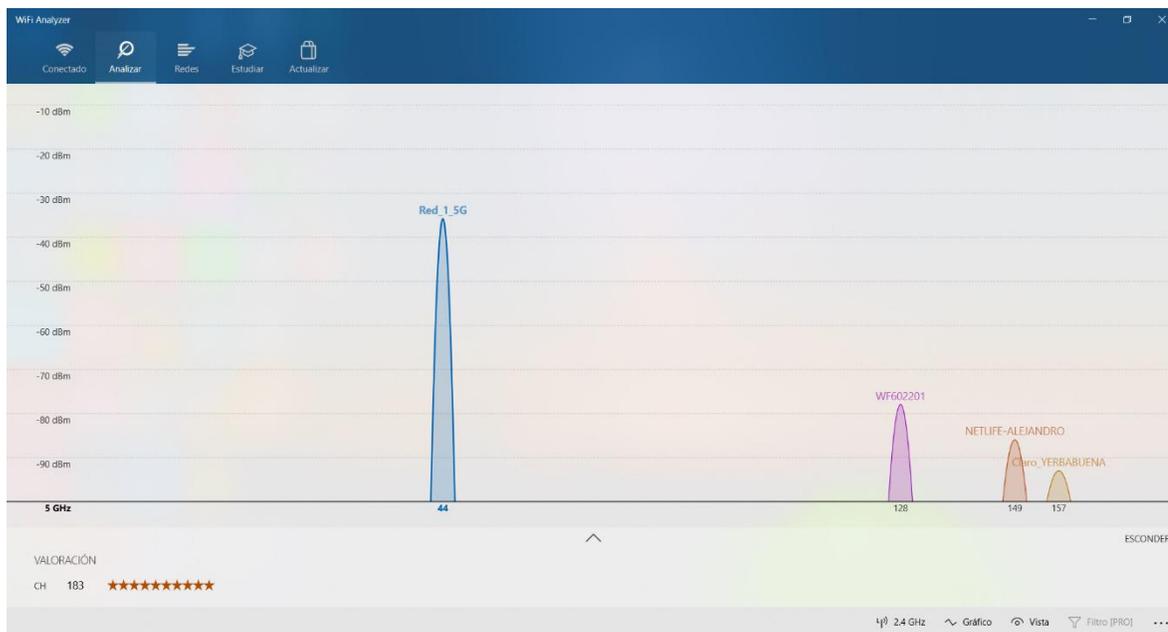
cercanas que operen en la misma banda de frecuencia al estándar de estudio. La banda de 5 GHz es una red menos congestionada en comparación con la de 2.4 GHz esto debido a que la mayoría de estándares IEEE 802.11 establecen dicha banda para su operación, sin embargo, al trabajar a frecuencias más altas se reduce el alcance de las ondas electromagnéticas de forma considerable.

WiFi Analyzer. Es importante determinar si en el lugar donde se pretende levantar los enlaces existen redes ajenas a las propuestas que puedan provocar interferencias no deseadas, ya que esto provocaría un peor desempeño de la red diseñada. Con esta consideración en cuenta, se ha optado por usar la herramienta de software WiFi Analyzer la cual es una aplicación gratuita disponible en la tienda de Windows que permite realizar un escaneo de las redes WiFi cercanas en las bandas de 2.4 y 5 GHz, donde se indica los canales ocupados por cada una de estas, el ancho de banda de canal y nivel de potencia, con lo que se puede verificar si en efecto existen canales solapados que interfieran con la red implementada.

La Figura 8 muestra la interfaz de la herramienta WiFi Analyzer donde se analiza las redes cercanas existentes en la banda de 5 GHz, sin introducir los routers generadores de interferencia, donde se puede apreciar que no existen redes externas que provoquen interferencias con lo que se garantiza un ambiente no interferido.

Figura 8

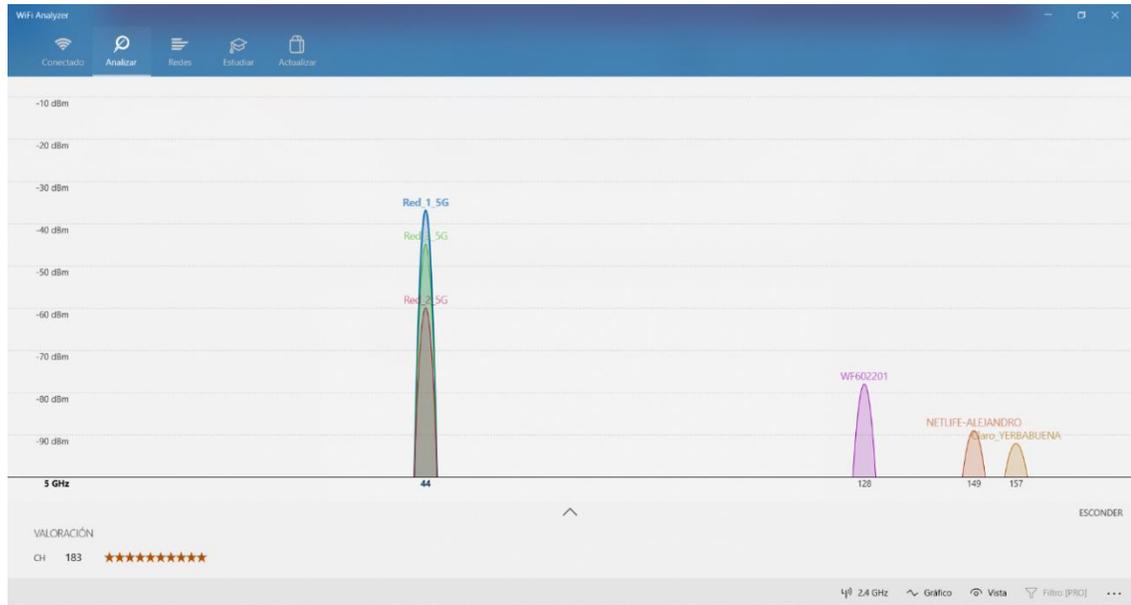
Escaneo de las redes de 5 GHz sin canales solapados



La Figura 9 muestra el escaneo de la red en la banda de 5 GHz una vez puestos en operación los routers generadores de interferencia, se puede notar el solapamiento en el canal 44, es decir se produce el efecto de interferencia de tipo co-canal.

Figura 9

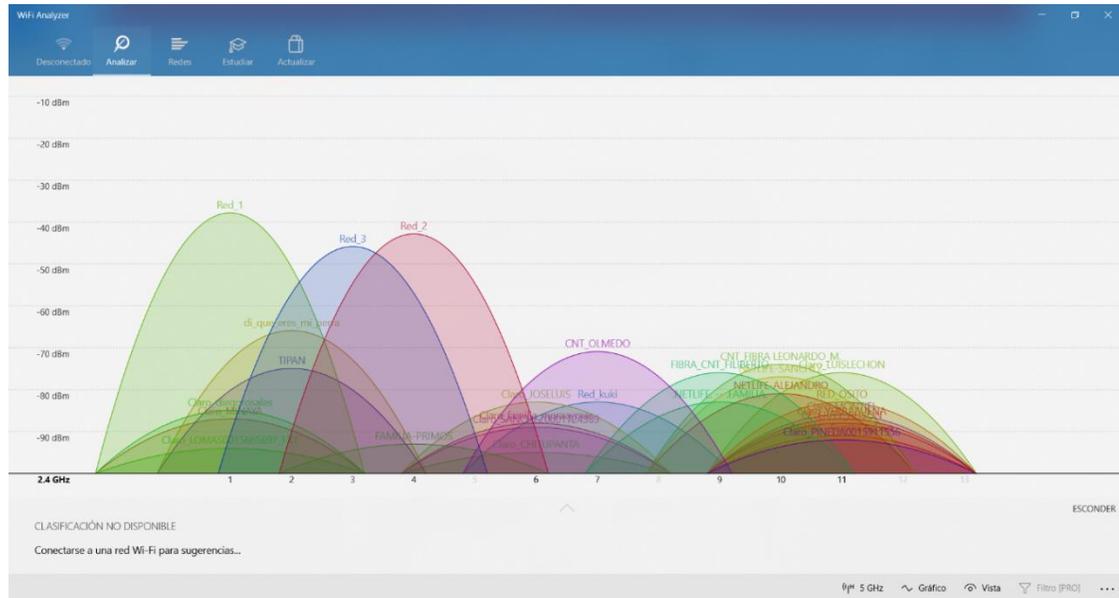
Escaneo de las redes de 5 GHz con canales solapados



La Figura 10 muestra las redes operantes en la banda de 2.4 GHz, donde se puede notar una mayor congestión de transmisiones en comparación con la banda de 5 GHz y además se puede distinguir los dos tipos de interferencias, tanto de canal adyacente, como co-canal.

Figura 10

Escaneo de las redes de 2.4 GHz



Capítulo 4

Diseño e Implementación de la Red

Descripción del lugar donde se implementa la red

Los enlaces se implementan dentro de un departamento residencial de aproximadamente $50 m^2$ de área de modo que se pueda evidenciar el comportamiento de la red inalámbrica en un entorno interior donde la comunicación entre los equipos que conforman la red es menos propensa a verse afectada por factores que degradan la calidad de la transmisión en comparación con las redes desplegadas en ambientes exteriores.

Existen varios factores que pueden comprometer el rendimiento de la red como las condiciones climáticas, la distancia entre los dispositivos, obstrucciones físicas, interferencias, limitaciones de la banda del espectro, acceso compartido, etc. Al desplegar una red en un ambiente *indoor* se reduce en cierta medida los efectos atenuantes de algunos de los fenómenos mencionados.

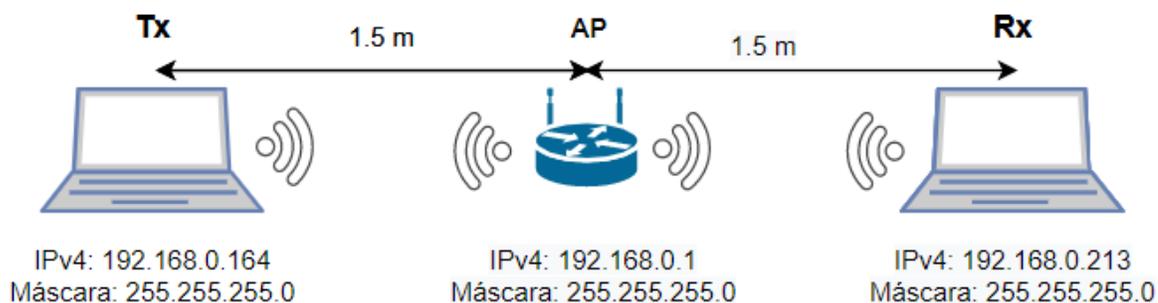
La red propuesta se implementa en una habitación de aproximadamente $4 m^2$, donde los suscriptores mantendrán permanente línea de vista con el punto de acceso a una distancia de un metro y medio.

Escenarios de Prueba

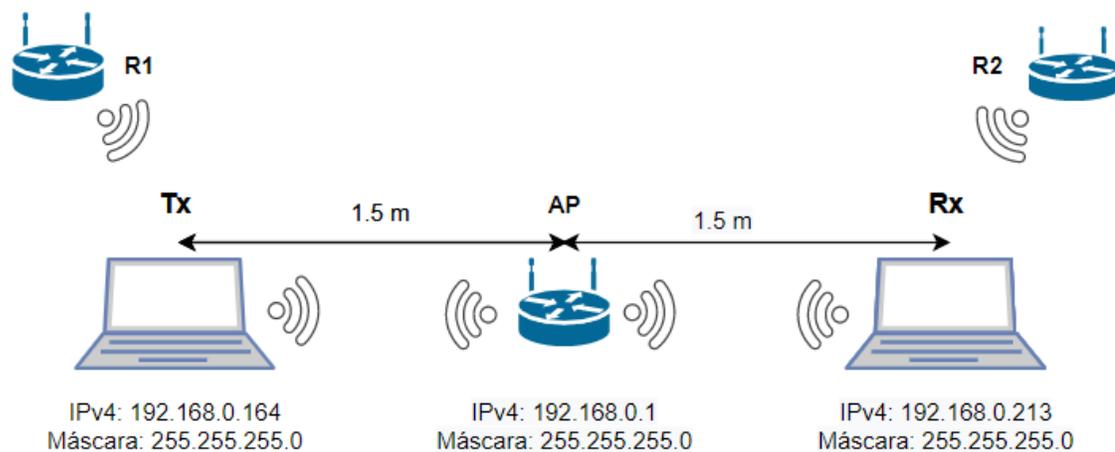
Una vez determinada la máxima capacidad del canal para 1 y 2 flujos respectivamente y dado que se quiere analizar el rendimiento de la red para las fases Wave 1 y Wave 2 del estándar en estudio, se implementan dos escenarios de red para realizar las inyecciones de tráfico. El primer escenario tiene como propósito determinar el rendimiento de la red para la fase Wave 1 para un entorno sin la presencia de interferencias del tipo co-canal y para un entorno donde si exista este tipo de

interferencia, en el primer caso intervienen únicamente las dos PC terminales y el AP, mientras que en el segundo caso se tiene una red compuesta por los mismos elementos a la cual se añaden dos routers que actúan como generadores de interferencia al trabajar en el mismo canal que el AP. En segundo escenario se pretende analizar el rendimiento del estándar en su fase Wave 2, y que al igual que en el primer escenario se mide en un entorno no interferido para lo cual la red se compone de una PC transmisora, una PC receptora y el AP y para el entorno interferido se implementa los equipos propuestos anteriormente y además se agregan dos routers de modo que se pueda evaluar la red en estas condiciones. En los dos escenarios propuestos se realizan inyecciones de tráfico a través del uso de los protocolos de capa de transporte TCP y UDP del modelo de referencia de OSI, a fin de identificar si el uso de estos protocolos afecta de algún modo a las métricas de desempeño obtenidas en cada prueba.

Escenario 1: Wave 1 sin interferencias. Se realizó un diagrama de la red a implementarse, tal como se muestra en la Figura 11, donde se indican los equipos que operan en la misma, así como las direcciones IPv4 y submáscaras de red de cada equipo, las cuales son asignadas de forma automática por el AP. La distancia establecida entre cada dispositivo es de 1.5 metros.

Figura 11*Esquema del Escenario de Prueba 1*

Escenario 1: Wave 1 interferido. De manera similar, se tiene un esquema del enlace planificado mostrado en la Figura 12. Se tiene la aparición de dos routers extra R1 y R2 los cuales son los que generan la interferencia de tipo co-canal.

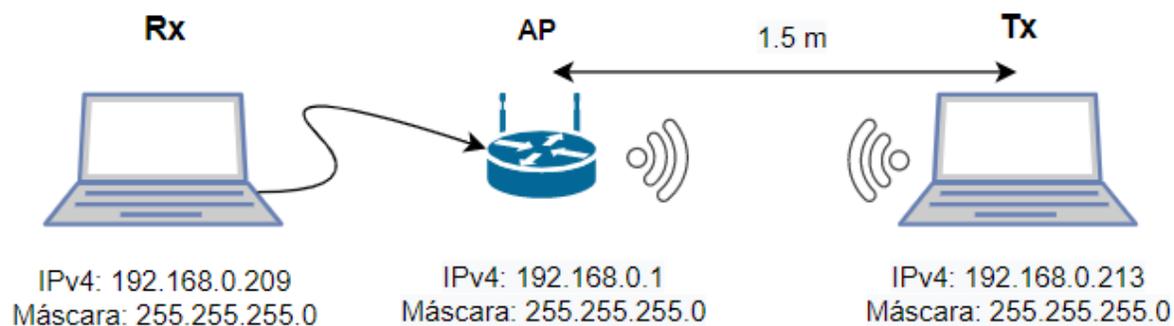
Figura 12*Esquema del Escenario de Prueba 1*

Escenario 2: Wave 2 sin interferencias. Se realizó un diagrama del diseño de la red para este escenario, presentado en la Figura 13. En este enlace es necesario conectar mediante cable Ethernet el equipo Receptor ya que la tarjeta de interfaz de red

del mismo no admite la tecnología MU-MIMO característica de la fase Wave 2 del estándar IEEE 802.11ac.

Figura 13

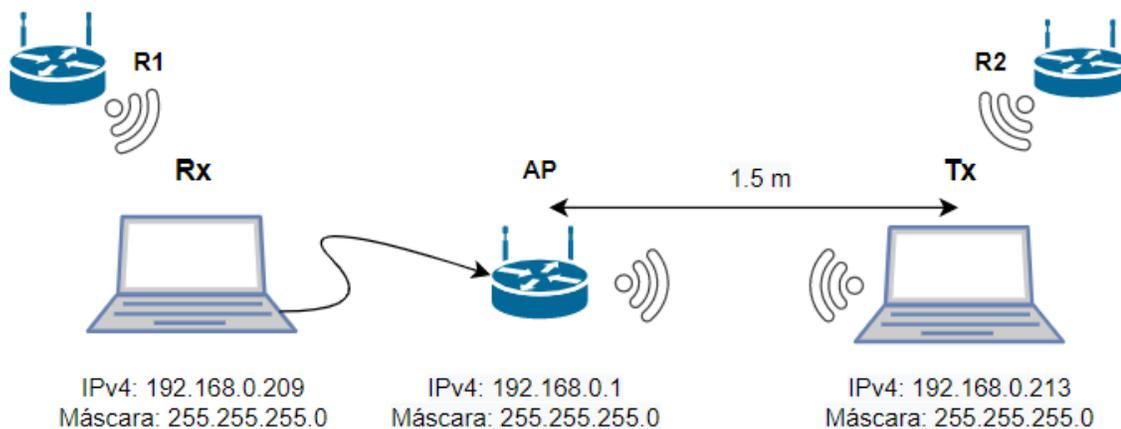
Esquema del Escenario de Prueba 2



Escenario 2: Wave 2 interferido. De igual forma se realiza un esquema del enlace para este escenario mostrado en la Figura 14. Se tiene la presencia de dos routers extra que operan en el mismo canal que el AP para generar la interferencia, mientras que el resto de los elementos de la red tienen la misma disposición descritas en el escenario 2 sin interferencias.

Figura 14

Esquema del Escenario de Prueba 2



Balance del Enlace

De acuerdo a lo explicado en el capítulo 1 referente a la relación entre la potencia recibida y el índice de MCS, es necesario determinar la potencia de recepción en los receptores de manera que se pueda identificar el índice MCS al que esa potencia se asocia y así establecer cuál es la velocidad teórica máxima de los enlaces en los dos escenarios de prueba.

Modelo de propagación para ambientes interiores. La ITU-R define este modelo de estimación de pérdidas para ambientes interiores válido para un rango de frecuencias de entre 900 MHz y 100 GHz dado por la siguiente ecuación (Torres et al., 2016):

$$L(dB) = L(d_0) + N \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + L_f(n),$$

donde:

N : coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia

f : Frecuencia (MHz)

d : separación entre el transmisor y el receptor (m)

d_0 : distancia de referencia (m)

$L(d_0)$: pérdida en el trayecto en d_0 (dB)

L_f : factor de pérdida debido a la penetración del suelo (dB)

n : número de pisos entre el transmisor y el receptor ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB para

$n = 0$

y:

$$L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28.$$

De acuerdo a las ecuaciones presentadas es posible calcular las pérdidas para el caso de estudio presente para lo cual se considera un coeficiente de pérdida de potencia igual a 30 dado por la ITU-R para un edificio residencial de paredes de concreto, una frecuencia de 5210 MHz correspondiente a la frecuencia central, una distancia entre el transmisor y receptor de 1.5 metros y un factor de pérdida debido a la penetración igual a 0 ya que no existen pisos entre el transmisor y receptor.

Con la información anterior se calcula en primer lugar las pérdidas en el trayecto

$$L(d_0) = 20 \log_{10}(5210) - 28$$

$$L(d_0) = 46.33 \text{ (dB)}$$

Una vez obtenido este valor es posible determinar las pérdidas para el entorno de prueba

$$L(\text{dB}) = 46.33 + 30 \log_{10} \left(\frac{1.5}{1} \right) + 0$$

$$L(dB) = 51.61 (dB)$$

Potencia recibida. La potencia recibida se mide en dB y se determina por la siguiente ecuación:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L,$$

donde:

P_{Tx} : potencia del transmisor

G_{Tx} : ganancia de la antena transmisora

G_{Rx} : ganancia de la antena receptora

L : pérdidas de propagación .

El cálculo de la potencia permite determinar el índice de MCS al que se asocia y posteriormente identificar la velocidad teórica del enlace, dicho valor se utiliza para el cálculo del *throughput* normalizado como se detalla en el siguiente capítulo.

Potencia recibida escenario 1. Para este escenario es necesario determinar la potencia recibida en dos segmentos del enlace, desde el transmisor (PC1) hasta el AP y desde el AP hasta el receptor (PC2), esto permite identificar cual es el cuello de botella ya que el valor más bajo de potencia se toma como referencia para seleccionar el índice de MCS.

En primer lugar se determina la potencia recibida en el segmento entre el transmisor y el AP para lo cual se consideran los valores de potencia de transmisión y ganancias de las antenas detallados en las especificaciones técnicas de los equipos con lo que se obtiene:

$$P_{Rx} = 15.2 \text{ dBm} + 6.6 \text{ dBi} + 2.98 \text{ dBi} - 51.61 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -26.83 \text{ dBm}$$

Luego de esto se calcula la potencia recibida en el tramo entre el AP y el receptor, para esto se consideran los valores de potencia de transmisión y ganancias de las antenas indicadas en su ficha técnica.

$$P_{Rx} = 20.25 \text{ dBm} + 2.98 \text{ dBi} + 2.92 \text{ dBi} - 51.61 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -25.46 \text{ dBm}$$

De acuerdo a lo obtenido es posible decir que las potencias recibidas en ambos segmentos del enlace no representan un cuello de botella debido a que la potencia mínima requerida para operar con un índice de MCS 9 es -51 dBm, por lo que la velocidad teórica del enlace para un flujo espacial es de 433.3 Mbps.

Potencia recibida escenario 2. Para este escenario solo se calcula el tramo entre el transmisor y el AP debido a que el resto del enlace corresponde a una comunicación cableada. De acuerdo a los valores indicados en las especificaciones técnicas se determina la potencia recibida en el AP:

$$P_{Rx} = 16.29 \text{ dBm} + 2.92 \text{ dBi} + 2.98 \text{ dBi} - 51.61 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -29.42 \text{ dBm}$$

La potencia de recepción obtenida corresponde a un índice de MCS de 9 y si se considera que para este escenario se transmiten dos flujos espaciales entonces se determina que la velocidad teórica de transmisión es de 866.7 Mbps.

Configuración del AP y Routers

Para configurar el AP y los routers R1 y R2 se requiere acceder a la GUI de administración de los mismos, para esto se utiliza un navegador web a través de la dirección IPv4 192.168.0.1, una vez ingresadas las credenciales se dirige a la pestaña

Red Inalámbrica en el ítem *Configuración Inalámbrica* y sección de *Configuraciones Avanzadas*, en esta sección se pueden configurar el modo de operación, ancho de banda, canal inalámbrico, potencia de transmisión de los equipos.

La Tabla 9 muestra las configuraciones realizadas con la diferenciación de que en el segundo escenario se habilita en el AP la funcionalidad MIMO Multi-Usuario.

Tabla 9

Parámetros definidos para el AP y routers

Parámetro	AP	Routers R1, R2
Modo	802.11n/ac mixto	802.11ac
Ancho de Banda (MHz)	80	80
Canal	44	44
Potencia	Alto	Alto
MIMO Multi-Usuario	Habilitada	Deshabilitada

Configuración de la GUI de D-ITG

Previo a realizar las distintas inyecciones de tráfico para cada escenario se debe configurar los equipos que intervienen en la comunicación de forma adecuada. Las estaciones suscriptoras transmisora y receptora se configuran de distinto modo, ya que mientras que para la primera se deben establecer los parámetros para enviar el flujo de información, la segunda se debe configurar para que esta estación opere en el modo de escucha de tal forma que este habilitada a recibir los paquetes.

Transmisor. En equipo transmisor se debe definir los parámetros relacionados al flujo de datos que se pretende enviar como se muestra en la Figura 15, mientras que

en la Tabla 10 se resumen los parámetros definidos para los escenarios 1 y 2. Los demás parámetros se mantienen en valores por defecto.

Figura 15

GUI D-ITG, Configuración del Flujo en el transmisor para el Escenario 1

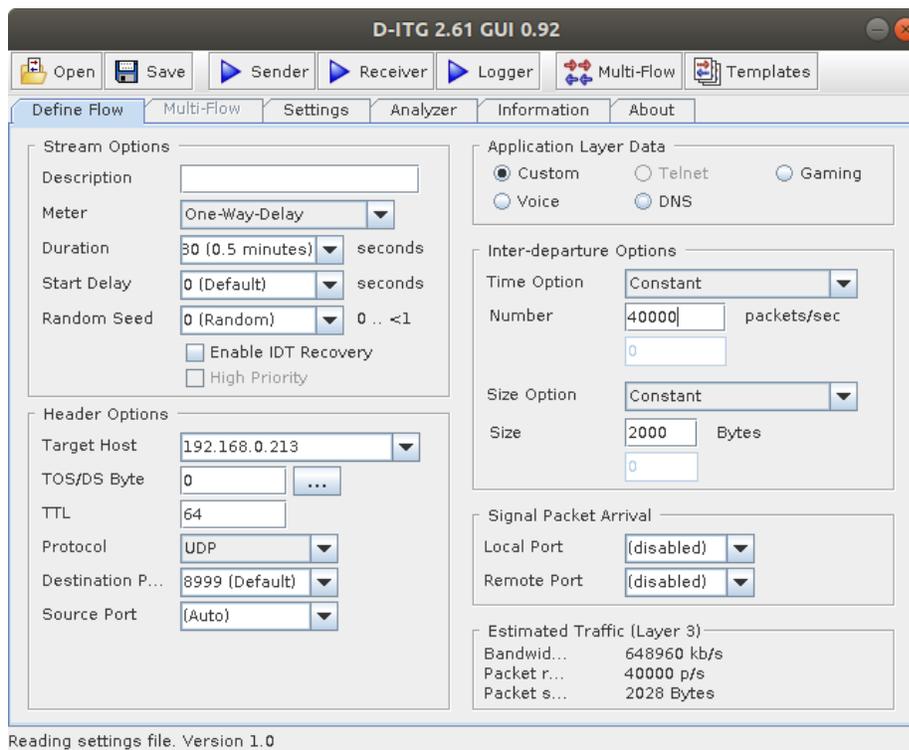


Tabla 10

Parámetros del flujo de datos configurados en el transmisor Escenario 1

Parámetro	Valor
Métrica	One Way Delay
Duración (seg)	30
Dirección de Destino	192.168.0.213
Puerto de Destino	8999
Protocolo	UDP/TCP
Número de Paquetes por Segundo (p/s)	20000

Parámetro	Valor
Tamaño (bytes)	2000

Para el escenario 2 se realiza la configuración de los parámetros de flujo en la pestaña Multi-Flow de la GUI de D-ITG debido a que en este escenario se van a enviar 2 flujos de datos simultáneamente. La Figura 16 muestra la configuración realizada, mientras que en la Tabla 11 se resumen los parámetros definidos para los escenarios mencionados.

Figura 16

GUI D-ITG, Configuración del Flujo en el transmisor para el Escenario 2

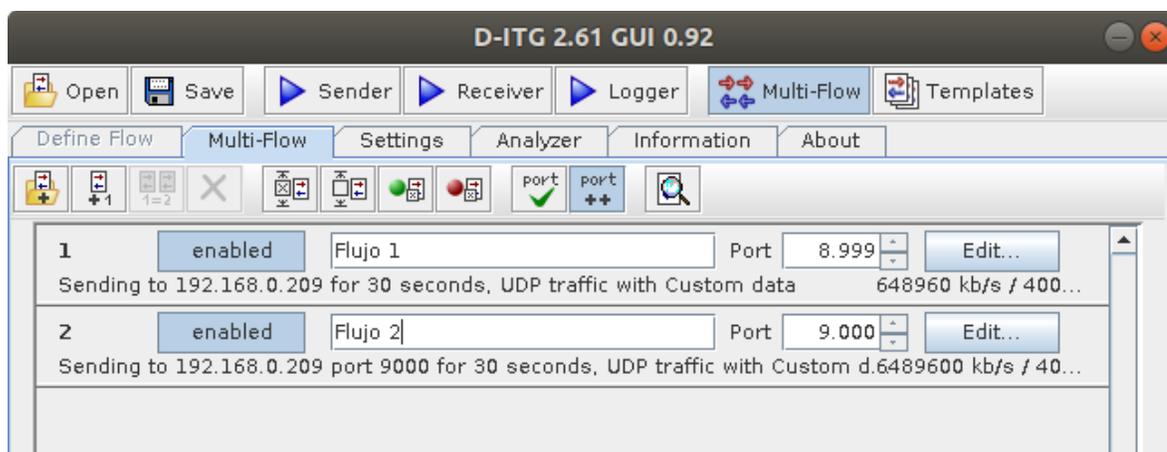


Tabla 11

Parámetros del flujo de datos configurados en el transmisor Escenario 2

Parámetro	Valor	
Flujo	1	2
Métrica	One Way Delay	One Way Delay
Duración (seg)	30	30
Dirección de Destino	192.168.0.209	192.168.0.209

Parámetro	Valor	
Puerto de Destino	8999	9000
Protocolo	UDP/TCP	UDP/TCP
Número de Paquetes por Segundo (p/s)	20000	20000
Tamaño (bytes)	2000	2000

En la pestaña *Settings* se especifica la dirección de los archivos binarios y la dirección Log donde se almacenan los archivos con extensión .log generados en la inyección. Los parámetros configurados en esta sección son *Remote Receiver Log* donde se establece la opción *Remote* la cual define que los ficheros se almacenaran en el Receptor y la opción *Logging File* que permite definir el nombre del archivo .log, en este apartado es fundamental recordar cambiar el nombre del fichero de salida después de cada inyección puesto a que, si se mantiene el mismo, los archivos se sobrescriben en la carpeta definida para su almacenamiento.

La Figura 17 muestra la pestaña *Settings* con su configuración, mientras que la Tabla 12 resume las opciones habilitadas. Esta configuración se mantiene en los 2 escenarios propuestos.

Figura 17

GUI D-ITG, Configuración en el transmisor

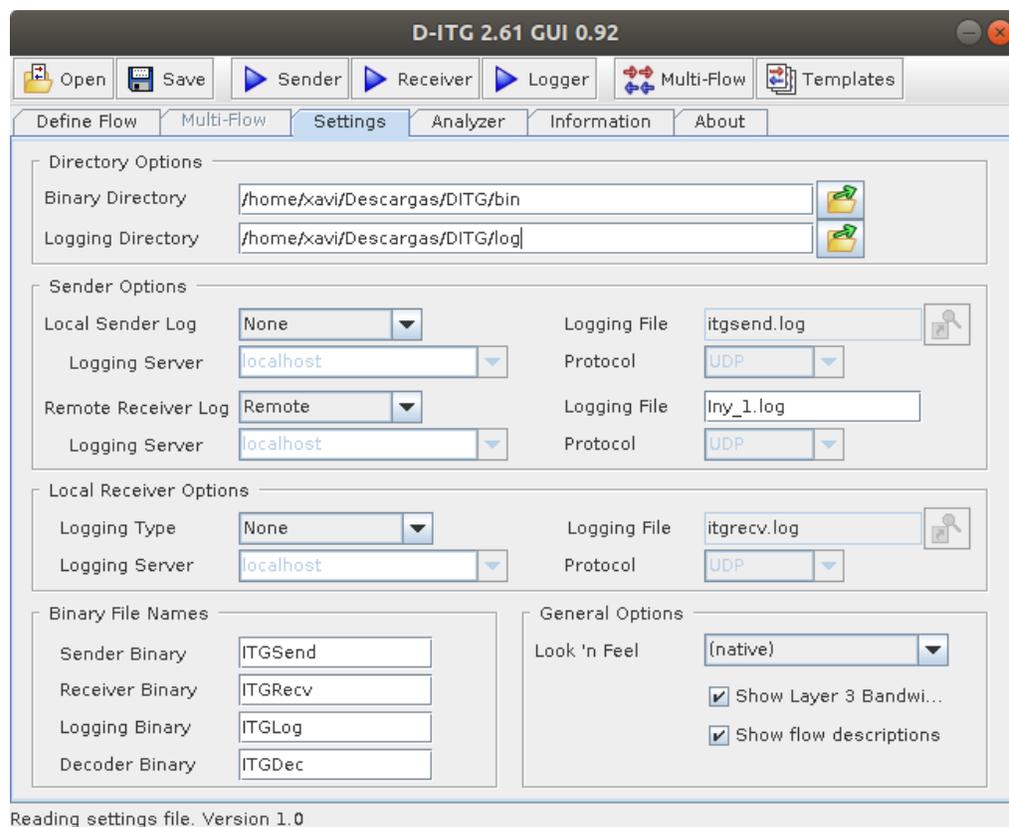


Tabla 12

Parámetros de configuración en el transmisor

Parámetro	Tipo
Local Sender Log	None
Remote Receiver Log	Remote
Logging Type	None
Logging Server	None

Receptor. En la pestaña *Define Flow* para la configuración para el receptor no es necesario configurar ningún parámetro puesto a que de este lado de la transmisión

únicamente se debe configurar al equipo para que entre en un modo de Escucha hasta que reciba los paquetes provenientes del transmisor.

En la Pestaña *Settings* es necesario al igual que en el transmisor, definir las direcciones de los archivos binarios y log. La Tabla 13 muestra las opciones seleccionadas en esta sección.

Tabla 13

Parámetros de configuración en el receptor

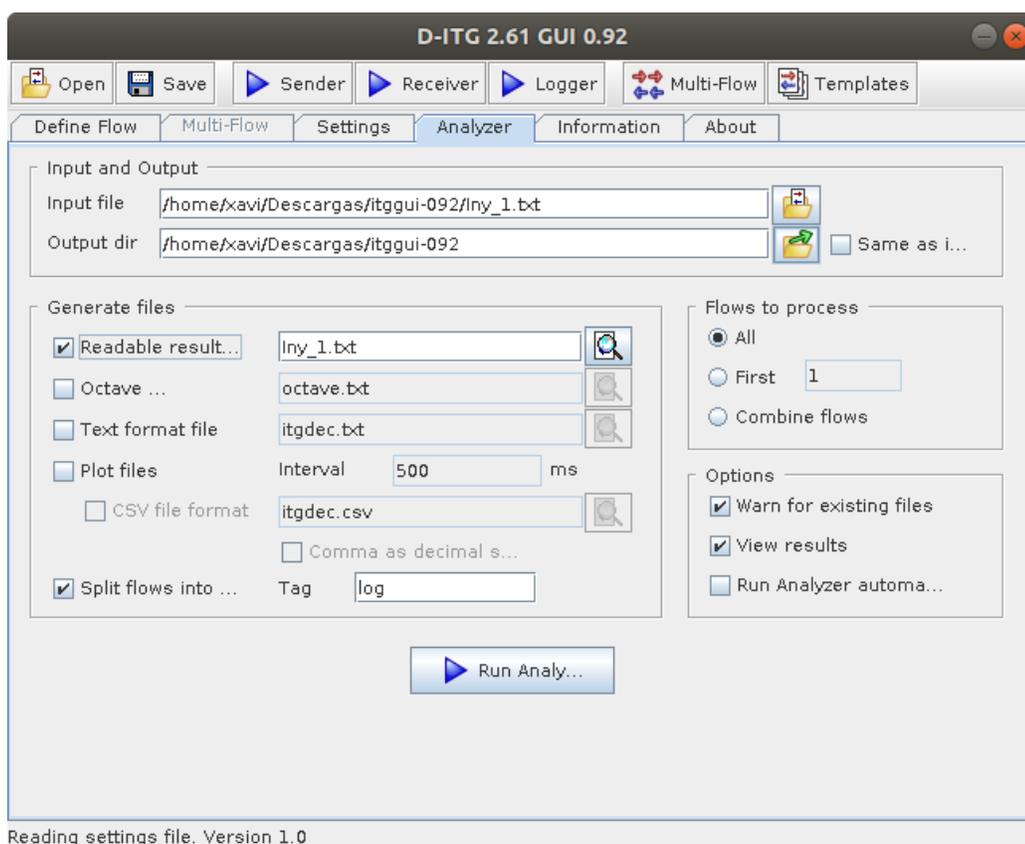
Parámetro	Tipo
Local Sender Log	None
Remote Receiver Log	None
Logging Type	None
Logging Server	None

Ya que la configuración realizada establece que los ficheros con extensión .log se almacenarán en un directorio del equipo receptor, es necesario una vez realizadas las inyecciones dirigirse a la pestaña *Analyzer*, en la misma se puede configurar los directorios de los archivos de entrada y salida, además se puede seleccionar los ficheros de salida que se deseen generar, en nuestro caso en particular se obtienen archivos .txt que detallan los resultados de la inyección. En este sentido los datos de interés son los valores de *delay*, *jitter*, *packet loss* y *throughput*, además se pueden obtener ficheros de extensión .dat de cada una de las 4 métricas asociadas a QoS las mismas que se pueden graficar a través del uso de herramientas complementarias como GNUPlot o Matlab, así mismo existe la posibilidad de obtener un archivo con extensión .csv donde se encuentra toda la información y datos obtenidos en cada

inyección de tráfico, este tipo de fichero es compatible con herramientas como Excel y Matlab. Al igual que con los ficheros .log es necesario cambiar los nombres de cada archivo .dat ya que de no hacerlo se sobrescribe la información. La Figura 18 muestra lo anteriormente descrito.

Figura 18

GUI D-ITG, Configuración de la Pestaña Analyzer en el receptor



Cálculo del Número de muestras

Debido a que el número de inyecciones que se realizan puede ser tan grande como se desee y por tanto el número de muestras también, se considera una expresión estadística para calcular un número de muestras que sea lo suficientemente fiable. Esta fórmula corresponde al cálculo de muestras para una población infinita y es la siguiente:

$$n = \frac{z^2 \times p \times q}{B^2},$$

donde, n indica el tamaño de la muestra, z corresponde a un parámetro estadístico que depende del nivel de confianza el cual se recomienda que sea del 95% o superior, p indica la probabilidad de que ocurra el evento, q es la probabilidad de que no ocurra el evento y es igual a $1-p$ y B el error de estimación máximo aceptado, valor que se recomienda se ubique entre 3 y 5%.

Se define un nivel de confianza del 95% que determina un valor de z igual a 1.96, se especifica un valor de p igual a 0.5 y por lo tanto q también es 0.5, finalmente se toma como error admitido B 0.04 correspondiente al 4%. De acuerdo a la ecuación anterior se determina el número de muestras requerido como se muestra a continuación:

$$n = \frac{1.96^2 \times 0.5 \times 0.5}{0.04^2}$$

$$n = 600.25$$

$$n \approx 600$$

Una vez realizado el cálculo del número de muestras se determina que es necesario obtener 600 muestras para cada escenario y por cada métrica de desempeño, mismas que se consiguen como se indica a continuación.

En cada una de las inyecciones se realiza un muestreo de los datos de 500 milisegundos, dado que cada inyección tiene una duración de 30 segundos, que puede ser por ejemplo la duración de un servicio como una llamada telefónica y que se extraen datos de las 4 métricas asociadas a QoS se obtiene un total de 240 muestras por cada inyección de tráfico, es decir 60 muestras del *bitrate*, 60 del *delay*, 60 del *jitter* y 60 de

los paquetes perdidos, entonces para alcanzar las 600 muestras por cada métrica de desempeño se realizan 10 inyecciones de tráfico por cada caso.

En total se realizan 80 inyecciones de tráfico repartidas de la siguiente manera: 10 inyecciones con el escenario Wave 1 no interferido con el uso del protocolo UDP y 10 más con el protocolo TCP, 10 inyecciones para el escenario Wave 1 interferido con el protocolo UDP y 10 inyecciones más con el protocolo TCP con lo que se obtiene 40 inyecciones para el escenario 1. Mientras que las 40 pruebas restantes realizadas se agrupan así: 10 inyecciones con el escenario Wave 2 no interferido con el protocolo UDP y 10 más con el protocolo TCP, 10 inyecciones para el escenario Wave 2 interferido con el protocolo UDP y 10 inyecciones más con el protocolo TCP.

Finalmente se obtiene en total una densidad de 19200 muestras repartidas en 2400 muestras para cada uno de los ocho casos descritos anteriormente. Se obtiene dicha cantidad de muestras con el fin de reducir el error cuadrático medio y realizar un análisis detallado de las métricas asociadas a la QoS.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados entregados por D-ITG luego de finalizar las 80 inyecciones de tráfico y obtener el número de muestras requerido para cada métrica de desempeño indicado en el capítulo 4.

Throughput Normalizado

Se toma el valor del throughput normalizado como medida de la eficiencia, el cual se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\eta_N = \frac{\eta}{RBR},$$

donde, η es el *throughput* recibido y RBR (del inglés *Raw Bite Rate*) corresponde a la tasa neta de transmisión, de tal forma que la eficiencia se expresa como el η_N en forma de porcentaje, como se muestra a continuación:

$$\eta_N(\%) = \eta_N \times 100$$

El valor del RBR se toma de las tasas indicadas en el router AP, ya que el equipo trabaja con las dos fases del estándar IEEE 802.11ac se considera dos valores distintos de RBR entre cada escenario: 433.3 Mbps para el primer escenario y 866.7 Mbps para el segundo escenario y ya que se tienen los valores medios de *throughput* reibido luego de cada inyección se procede a calcular el valor de la eficiencia para cada caso de prueba, mientras que el resto de métricas se mantienen en los valores medios obtenidos ya que estas obedecen a la metodología de obtener un porcentaje de paquetes perdidos inferior al 5% en cada inyección. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a aquellos donde no se supero el máximo de 5% de paquetes perdidos de entre varias inyecciones realizadas.

Resultados Escenario 1: Wave 1 sin interferencias

Los resultados obtenidos una vez terminadas las pruebas en el primer escenario y con el protocolo UDP se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14

Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno no interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.16	9.21	145.00	180.81
2	0.45	1.59	145.00	180.75
3	0.06	11.04	146.00	179.46
4	0.02	3.42	139.00	181.26
5	0.20	0.05	145.00	180.42
6	0.28	5.11	154.00	172.81
7	0.01	4.01	153.00	173.45
8	0.11	2.51	156.00	170.20
9	0.72	19.92	161.00	185.13
10	0.68	13.94	164.00	181.64

El $\bar{\eta}$ para este escenario al trabajar con el protocolo UDP es de 178.59 Mbps por lo que al dividir este valor para un RBR de 433.3 Mbps se obtiene un η_N igual a 0.4121. Con esta información se presentan los valores medios de las métricas de desempeño *delay*, *jitter*, paquetes perdidos y además el valor de la eficiencia en forma porcentual de acuerdo a la anterior ecuación.

$$\overline{Delay} = 7.08 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 150.80 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0.27\%$$

$$\eta_N(\%) = 41.21\%$$

Los resultados obtenidos para este escenario con el uso del protocolo TCP son los que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno no interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.00	135.61	173.00	177.25
2	0.00	143.61	168.00	181.87
3	0.00	132.62	173.00	176.67
4	0.00	143.59	168.00	182.00
5	0.00	144.81	167.00	182.33
6	0.00	144.05	165.00	184.48
7	0.00	145.95	168.00	181.56
8	0.00	150.80	171.00	178.41
9	0.00	147.54	169.00	181.12
10	0.00	143.22	165.00	185.16

En este caso al utilizar el protocolo TCP en este escenario se obtiene un $\bar{\eta}$ de 181.09 Mbps, por lo cual se determina un valor de η_N igual a 0.4179. A continuación se presentan la eficiencia obtenida para este caso y los valores medios de las demás

métricas asociadas a la QoS donde se destaca que al trabajar con un protocolo de capa de transporte del tipo orientado a la conexión, en el cual se garantiza la retransmisión de paquetes hasta que lleguen al destino, por lo que no se tienen paquetes perdidos en las transmisiones.

$$\overline{Delay} = 143.18 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 168.70 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes\ Perdidios}(\%) = 0\%$$

$$\eta_N(\%) = 41.79 \%$$

Resultados Escenario 1: Wave 1 interferido

Los resultados para este escenario con el protocolo de capa de transporte UDP se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16

Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.10	31.52	150.00	169.75
2	0.90	9.25	147.00	171.99
3	0.02	2.33	150.00	173.55
4	1.28	34.79	144.00	175.06
5	0.02	21.60	138.00	179.94
6	0.05	7.44	147.00	177.29
7	0.11	50.89	155.00	171.63

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
8	0.17	50.07	160.00	166.34
9	0.01	50.12	152.00	172.98
10	0.05	49.73	149.00	176.02

El $\bar{\eta}$ para este escenario con el protocolo UDP es de 173.45 Mbps por lo que se obtiene un η_N de 0.4003. A continuación se presentan los valores medios de las parámetros de interés en este estudio.

$$\overline{Delay} = 30.77 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 149.20 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0.27 \%$$

$$\eta_N(\%) = 40.03 \%$$

Las muestras obtenidas para este escenario con el uso del protocolo TCP se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17

Escenario 1, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.00	142.78	175.00	174.61
2	0.00	159.08	197.00	155.73
3	0.00	139.75	174.00	175.72

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
4	0.00	140.00	172.00	177.30
5	0.00	154.89	189.00	161.94
6	0.00	143.04	176.00	173.59
7	0.00	145.73	179.00	171.09
8	0.00	142.67	176.00	173.40
9	0.00	145.74	177.00	172.99
10	0.00	148.77	184.00	166.59

En este caso se tiene un $\bar{\eta}$ de 170.30 Mbps por lo que al dividirlo por el RBR se obtiene un η_N igual a 0.3930. Con esto se determina el $\eta_N(\%)$ el cual se muestra a continuación junto con las demás métricas de desempeño.

$$\overline{Delay} = 146.25 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 179.90 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0\%$$

$$\eta_N(\%) = 39.30 \%$$

Resultados Escenario 2: Wave 2 sin interferencias

En escenario se obtienen las muestras con el uso del protocolo UDP, mismos que se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18

Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno no interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.01	20.49	209.00	309.86
2	0.00	19.51	210.00	307.93
3	0.00	20.77	210.00	308.51
4	0.00	10.19	151.00	317.64
5	0.00	13.90	154.00	319.44
6	0.00	19.85	155.00	316.74
7	0.00	2.16	149.00	315.84
8	0.00	5.48	156.00	311.88
9	0.00	22.91	212.00	304.38
10	0.00	23.31	207.00	312.95

En este escenario se obtuvo un valor del $\bar{\eta}$ de 312.52 Mbps al utilizar el protocolo UDP. Para el escenario 2 se toma como RBR 866.7 Mbps por lo que se obtiene un η_N de 0.3605. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las métricas de desempeño.

$$\overline{Delay} = 15.86 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 181.30 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0\%$$

$$\eta_N(\%) = 36.05 \%$$

Las muestras obtenidas para este escenario y con el uso del protocolo TCP se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno sin interferencias

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [kbps]
1	0.00	192.44	525.00	279.36
2	0.00	191.17	651.00	283.73
3	0.00	197.04	622.00	282.17
4	0.00	195.91	634.00	279.12
5	0.00	194.88	578.00	282.45
6	0.00	192.86	506.00	286.06
7	0.00	195.77	561.00	284.94
8	0.00	191.68	589.00	278.61
9	0.00	196.22	589.00	277.37
10	0.00	197.43	612.00	279.41

En este caso se determina un $\bar{\eta}$ 281.32 Mbps con lo que se calcula un valor de η_N de 0.3245. Los resultados obtenidos respecto a las métricas de desempeño se presentan a continuación.

$$\overline{Delay} = 194.54 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 586.70 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0\%$$

$$\eta_N(\%) = 32.45 \%$$

Throughput Normalizado Escenario 2: Wave 2 interferido

Las muestras obtenidas para este escenario con el protocolo UDP se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20

Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo UDP en un entorno interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.00	39.23	161.00	312.14
2	0.00	45.60	158.00	312.62
3	0.00	49.47	154.00	305.79
4	0.00	45.20	210.00	308.88
5	0.00	45.60	206.00	313.00
6	0.00	45.98	207.00	312.39
7	0.00	44.78	157.00	312.37
8	0.00	46.77	206.00	313.35
9	0.00	39.99	153.00	283.50
10	0.00	47.20	206.00	314.48

En este escenario bajo el protocolo UDP se tiene un valor de $\bar{\eta}$ de 308.85 Mbps por lo que se obtiene un η_N igual a 0.3563. Los valores medios de cada métrica se muestran a continuación.

$$\overline{Delay} = 44.98 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 181.80 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0\%$$

$$\eta_N(\%) = 35.63 \%$$

Los resultados obtenidos luego de las inyecciones para este escenario con el uso del protocolo TCP se resumen en Tabla 21.

Tabla 21

Escenario 2, resultados de las inyecciones con el protocolo TCP en un entorno interferido

Inyección	Paquetes Perdidos [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Throughput [Mbps]
1	0.00	201.90	645.00	279.29
2	0.00	201.98	689.00	279.16
3	0.00	202.10	602.00	277.31
4	0.00	204.23	560.00	280.13
5	0.00	193.22	571.00	273.79
6	0.00	206.25	527.00	280.50
7	0.00	202.48	492.00	281.93
8	0.00	209.40	617.00	277.65
9	0.00	206.80	766.00	277.89
10	0.00	206.14	522.00	278.19

Con el uso del protocolo TCP se tiene un $\bar{\eta}$ de 278.58 Mbps, con lo que se obtiene un η_N igual a 0.3214. Es así que los resultados referentes a las métricas de desempeño se muestran a continuación.

$$\overline{Delay} = 203.45 \text{ ms}$$

$$\overline{Jitter} = 599.10 \text{ us}$$

$$\overline{Paquetes Perdidos}(\%) = 0\%$$

$$\eta_N(\%) = 32.14 \%$$

Los valores obtenidos anteriormente referidos al *throughput* normalizado se evalúan con las demás métricas de desempeño; *delay*, *jitter* y paquetes perdidos.

A continuación en la Tabla 22 se resumen los valores obtenidos de paquetes perdidos, *throughput* normalizado, *delay* y *jitter* en los diferentes escenarios.

Tabla 22

Resultados obtenidos de las métricas de desempeño en cada escenario de prueba

Escenario	Protocolo	Throughput			Paquetes
		Normalizado [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Perdidos [%]
Wave 1 no interferido	UDP	41.21	7.08	150.80	0.27
Wave 1 no interferido	TCP	41.79	143.18	168.70	0
Wave 1 interferido	UDP	40.03	30.77	149.20	0.27
Wave 1 interferido	TCP	39.30	146.25	179.90	0
Wave 2 no interferido	UDP	36.05	15.86	181.30	0

Escenario	Protocolo	Throughput			Paquetes
		Normalizado [%]	Delay [ms]	Jitter [us]	Perdidos [%]
Wave 2 no interferido	TCP	32.45	194.54	586.70	0
Wave 2 interferido	UDP	35.63	44.98	181.80	0
Wave 2 interferido	TCP	32.14	203.45	599.10	0

Comparativa de Resultados

Para realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos se hace uso de la herramienta de programación Matlab donde se extraen los datos obtenidos a partir de los ficheros con extensión .csv proporcionados por D-ITG.

Una vez se tienen las muestras requeridas se utiliza el comando *boxplot* que permite obtener una representación gráfica de los datos a través de cuartiles, mismos con los que se puede identificar los valores máximos, mínimos, mediana y valores atípicos de un conjunto de datos con lo que se puede determinar el tipo de distribución que tiene así como el tipo de simetría, esto permite reducir la complejidad a la hora de comparar los distintos escenarios planteados en este estudio si se considera la gran cantidad de datos que se tiene. Los *scripts* generados en Matlab se encuentran en el Anexo 2 apartados A, B, C y D.

A continuación se presenta la comparativa de los casos descritos en el capítulo 4 para cada métrica de desempeño asociada a la QoS.

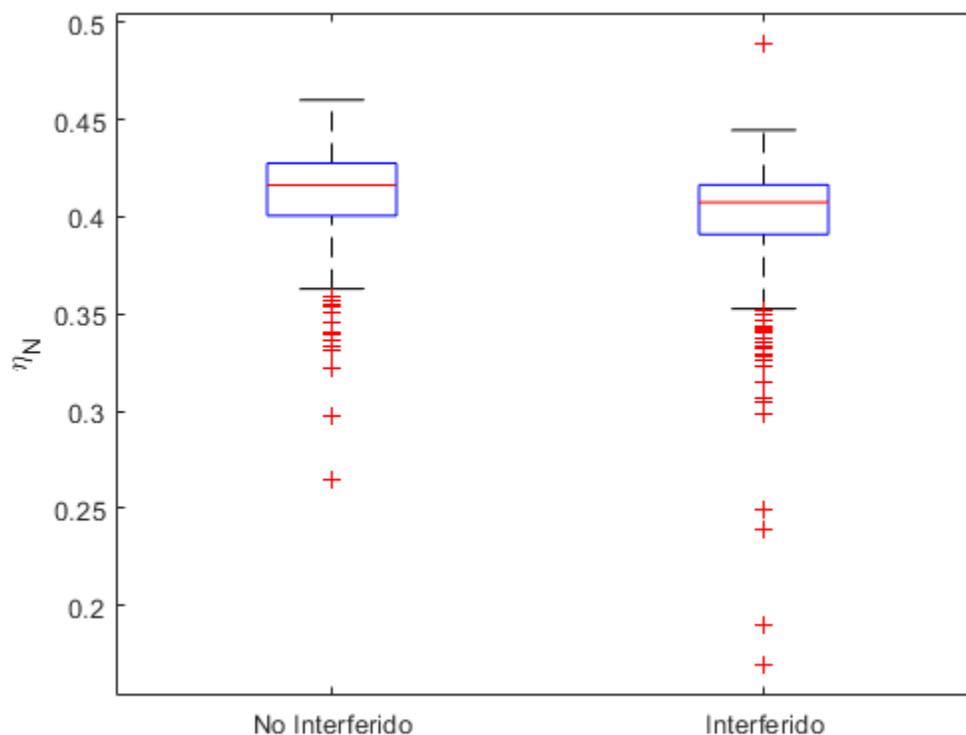
Comparativa de Resultados Throughput Normalizado

A continuación se muestran los valores correspondiente al *throughput* normalizado en los distintos escenarios de prueba.

La Figura 19 muestra el diagrama de cajas y bigotes del escenario Wave 1 con el protocolo UDP. Se puede observar que para un ambiente no interferido se tiene una distribución asimétrica negativa, donde el valor de la mediana corresponde a 0.4163, además se tiene un total de 16 valores atípicos que representan 2.67% de las muestras. Así mismo se tiene que para un entorno interferido la distribución de los datos tiene una asimetría negativa, en este caso el valor de la mediana es 0.4075, por otro lado se contabilizan un total de 29 *outliers* correspondientes al 4.83% de los datos. Se puede apreciar así, que dentro del entorno no interferido se encuentran las mejores condiciones de *throughput* normalizado puesto a que los valores de media y mediana son mayores en este caso lo que indica un mejor desempeño. Con la información obtenida se determina en el valor de la mediana una reducción del 0.88% de la eficiencia, mientras que de acuerdo a los valores de la media se presenta una reducción en la eficiencia del 1.18% para el entorno en el que se opera en presencia de interferencias respecto al entorno no interferido.

Figura 19

Throughput normalizado. Escenario 1, protocolo UDP

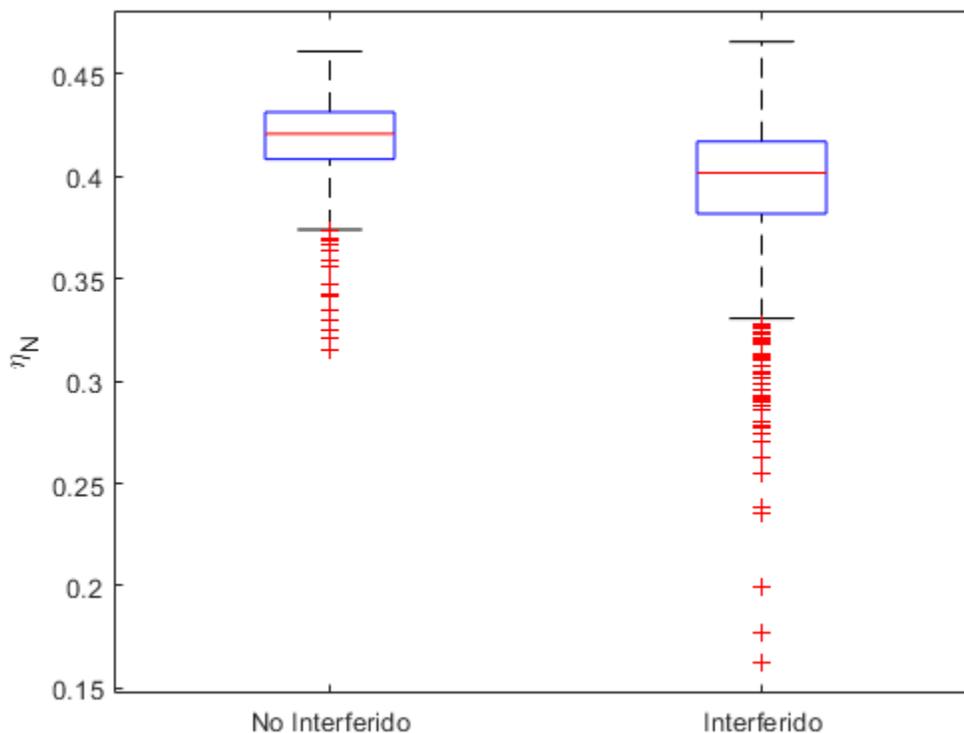


En la Figura 20 se presenta el *boxplot* para el escenario Wave 1 con el uso del protocolo TCP. Se tiene que para un entorno no interferido una distribución de los datos asimétrica negativa con una mediana de 0.4208, se evidencia además, un total de 18 valores atípicos que corresponden al 3% de los datos. Por otro lado para el entorno interferido se tiene también una distribución negativa, donde el valor de la mediana corresponde a 0.4017, también se tiene un porcentaje de 7.83% de *outliers* en el conjunto de datos. Se puede observar que en el segundo caso se tiene una mayor dispersión de las muestras ya que la caja es más grande en comparación con la del primer caso, además los valores atípicos tienden a valores muy por debajo de la caja, con lo que se deduce que el escenario no interferido ofrece un mejor desempeño. Se

tiene para el entorno interferido una reducción del 1.91% de la eficiencia respecto al escenario sin interferencias en cuanto a los valores de la mediana, mientras que al considerar los valores de la media se obtiene una reducción del 2.49 %.

Figura 20

Throughput normalizado. Escenario 1, protocolo TCP

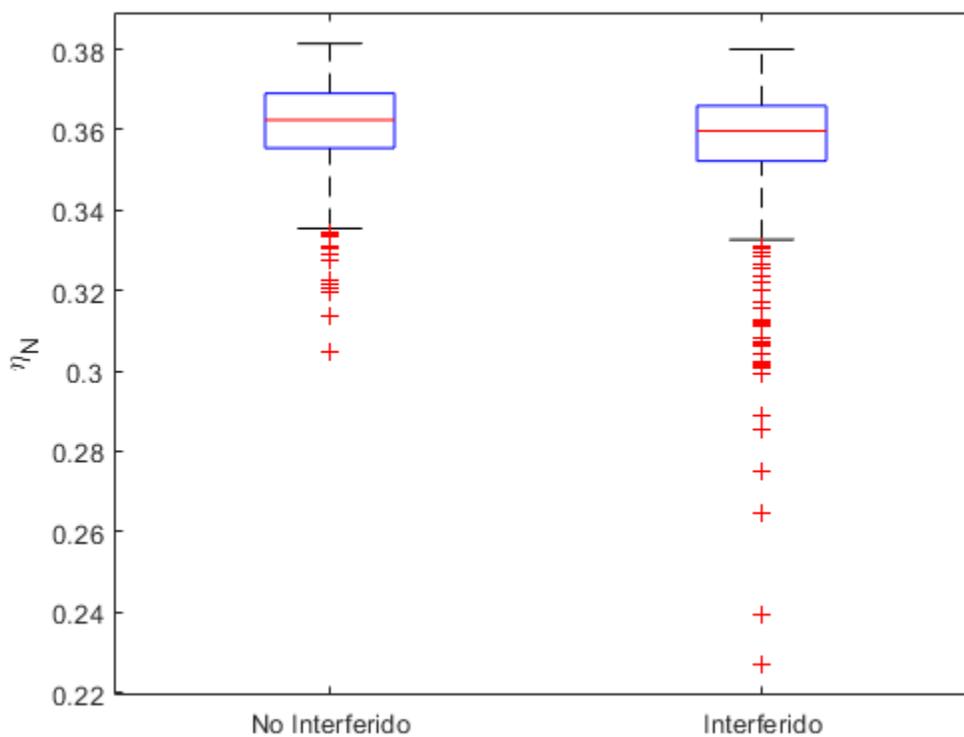


La Figura 21 muestra el diagrama de cajas y bigotes para el escenario Wave 2 con el uso del protocolo UDP. En el entorno no interferido se presenta una distribución asimétrica negativa con una mediana de 0.3624, se tiene también un total del 17 valores atípicos que representan el 2.83% de las muestras. En el entorno interferido se tiene un diagrama con una distribución negativa con una mediana de 0.3597 y además un total de 33 *outliers* correspondientes al 5.5% de los datos. Las cajas para ambos entornos indican poca dispersión de los datos ya que ambas son estrechas, sin embargo en el

entorno no interferido se observa un mejor desempeño ya que la caja se encuentra más arriba que en el entorno interferido, además se presentan un menor número de *outliers* mismos que se ubican más cerca de la caja en comparación con el otro caso. En este caso y de acuerdo a los valores de la mediana existe una reducción del 0.27% de eficiencia respecto al entorno que no se ve afectado por interferencias, mientras que al comparar los valores medios se determina una reducción del 0.42%.

Figura 21

Throughput normalizado. Escenario 2, protocolo UDP

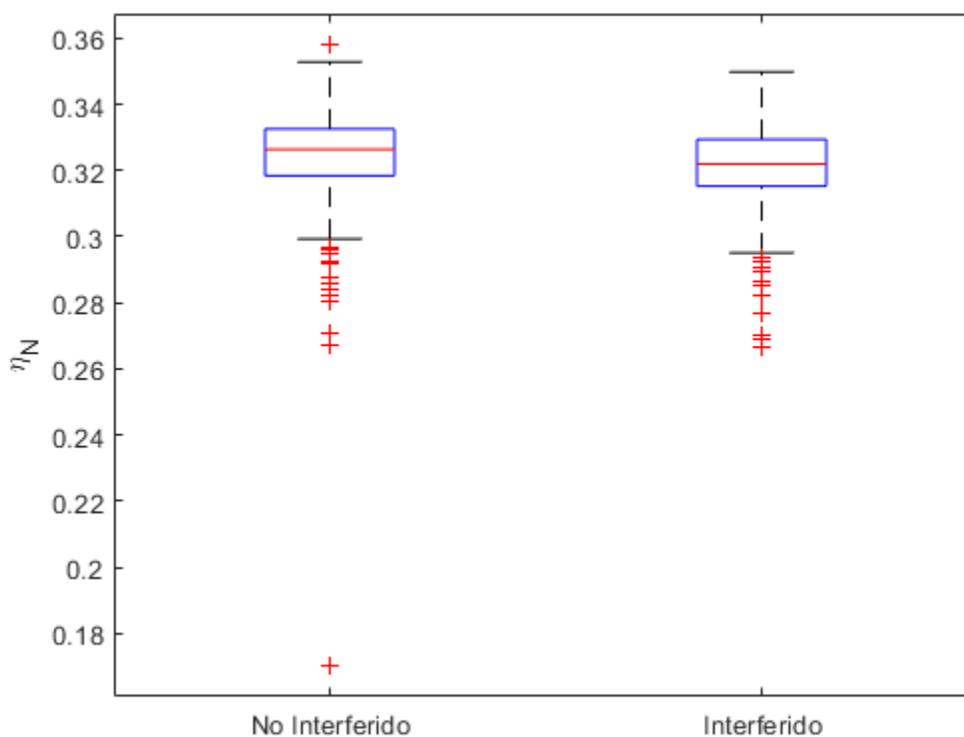


La Figura 22 presenta el *boxplot* para el escenario Wave 2 con el protocolo TCP. Se puede observar que para el entorno no interferido se tiene una dispersión asimétrica negativa con un valor de mediana de 0.3265, en este caso se tiene un porcentaje del 2.67% de valores atípicos. En el entorno interferido se tiene una distribución asimétrica

positiva con una mediana de 0.3220 y un total de 14 *outliers* correspondientes al 2.33% de los datos. Se puede observar que existe una variabilidad de los datos similar en ambos casos, sin embargo los valores máximo, mínimo y mediana se ubican un poco por encima en el entorno no interferido en comparación con el interferido lo que determina un mejor desempeño. En el escenario de prueba interferido se determina al considerar los valores de la mediana una eficiencia reducida en un 0.45% respecto al entorno no interferido, por otro lado se tiene una reducción del 0.31% de acuerdo a los valores de la media.

Figura 22

Throughput normalizado. Escenario 2, protocolo TCP



Al comparar todos los diagramas de cada escenario se puede decir que el escenario Wave 1 en cada entorno y para cada protocolo presenta un mejor rendimiento

que el escenario Wave 2, también es notorio que la mayoría de valores atípicos en cada caso se ubican por debajo al valor mínimo del *boxplot*.

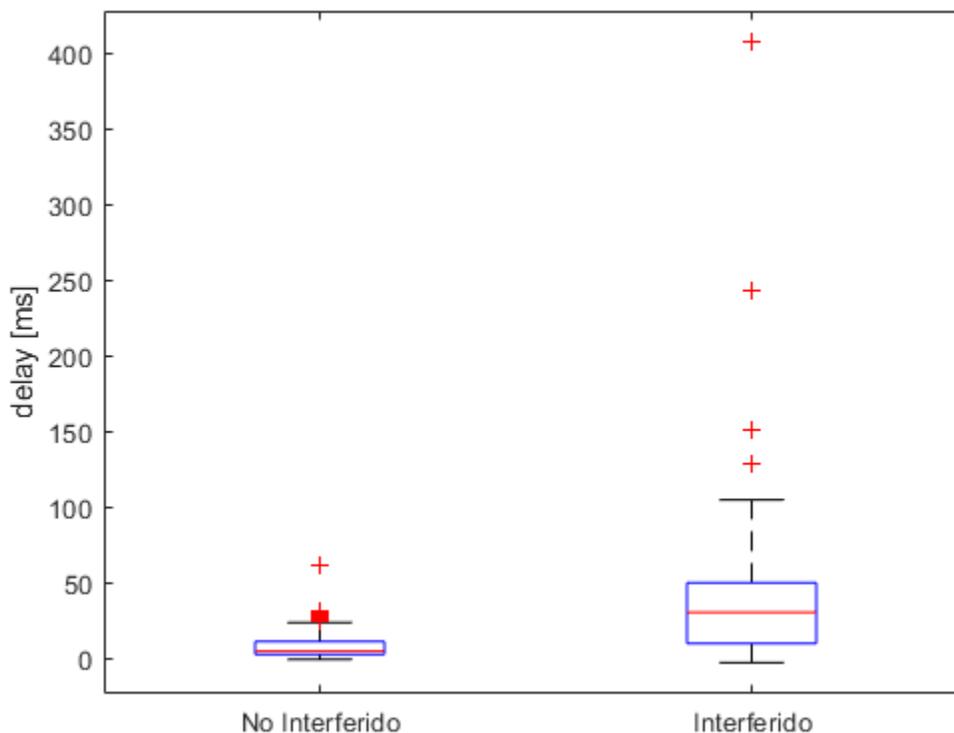
Comparativa de Resultados Delay

A continuación se muestran los valores correspondiente al *delay* en los distintos escenarios de prueba.

La Figura 23 muestra los datos del escenario Wave 1 con el protocolo UDP. En primera instancia se tiene que en el entorno no interferido se presenta una distribución asimétrica positiva con una mediana de 4.516 ms, un total de 18 valores atípicos que corresponden al 3% de las muestras. Así mismo para el entorno interferido una distribución asimétrica negativa de mediana 30.24 ms y con un porcentaje de valores atípicos igual a 4 correspondiente al 0.67%. En este escenario se puede notar que para el entorno interferido existe una mayor inestabilidad ya que la variabilidad de los datos es mucho mayor que el del entorno no interferido, lo que indica que en el ambiente no interferido se presentan menores tiempos de retardo. El valor de la mediana presenta una reducción del 85.06% para el entorno no respecto al interferido, mientras que al considerar los valores medios se tiene una reducción del 76.99%.

Figura 23

Delay. Escenario 1, protocolo UDP

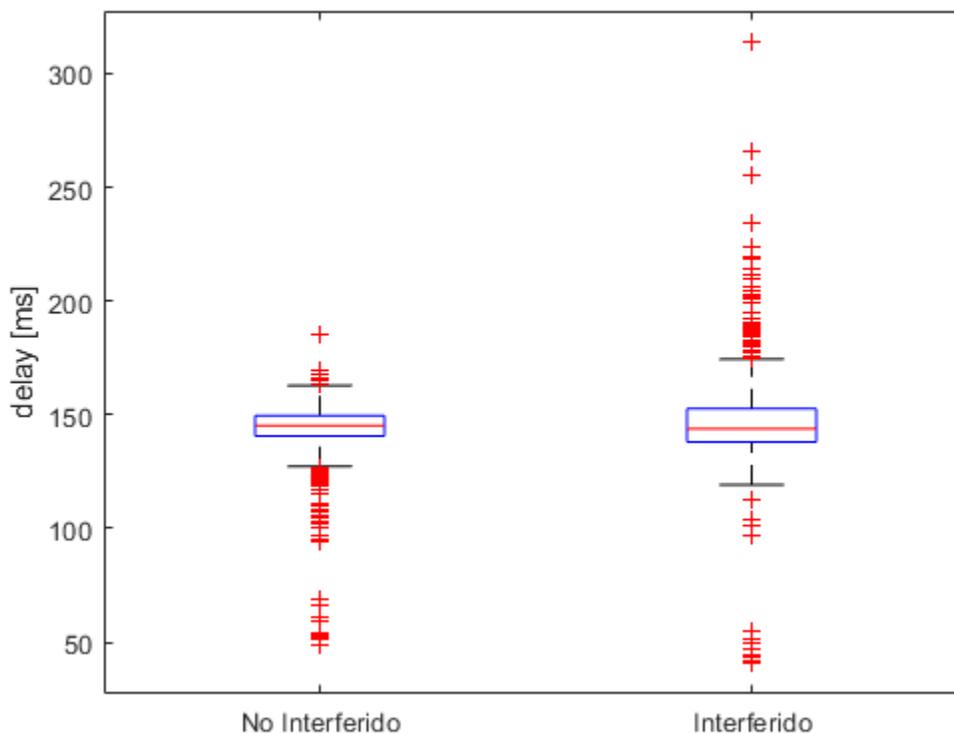


La Figura 24 presenta el *boxplot* del escenario Wave 1 con el protocolo TCP. En el caso del entorno no interferido se tiene una distribución de los datos asimétrica negativa, una mediana de 145.164 ms y un porcentaje del 7.83% de valores atípicos. Por otra parte en el entorno interferido se tiene una distribución asimétrica positiva, con mediana 143.78 ms y un total de 57 *outliers* correspondientes al 9.5% de las muestras. En este escenario se observa que el entorno interferido presenta una mayor inestabilidad y además un mayor número de datos atípicos, donde gran cantidad de los mismos se ubican por encima de la caja. Esto permite concluir que en el entorno no interferido se consiguieron mejores resultados. Se calcula una diferencia en la mediana

del 0.96% entre el entorno no interferido y el interferido y en cuanto a los valores medios se obtiene una reducción del 2.09%.

Figura 24

Delay. Escenario 1, protocolo TCP

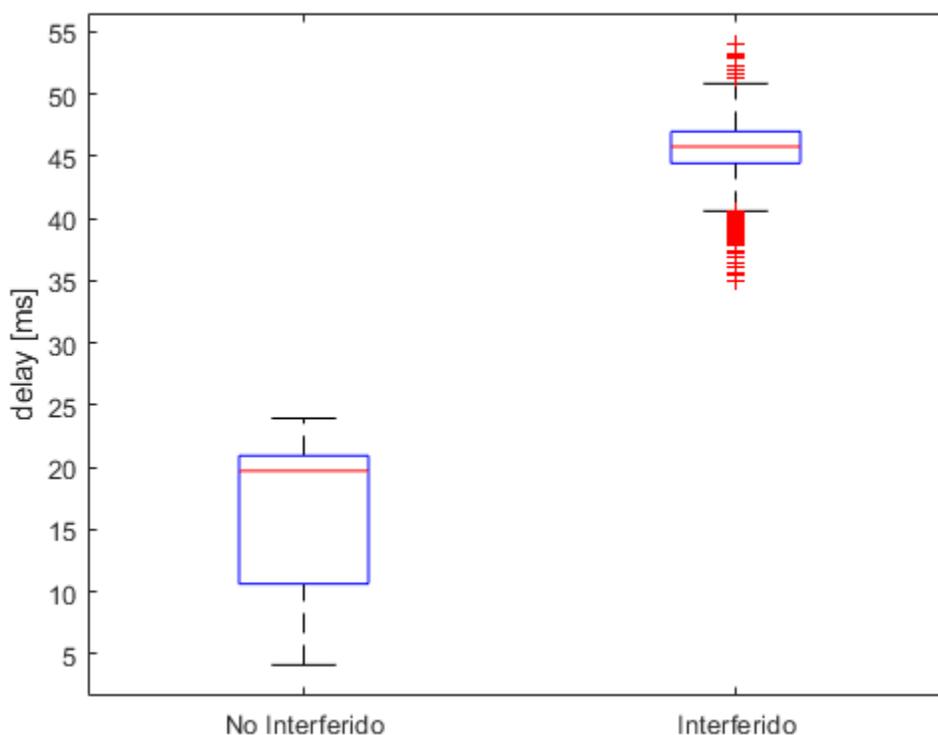


La Figura 25 muestra los datos del escenario Wave 2 con el protocolo UDP. Se tiene que para un entorno no interferido se observa una distribución asimétrica negativa con una mediana de 19.722 ms y un porcentaje de 0% correspondiente al número de valores atípicos. En el entorno interferido se tiene una distribución asimétrica negativa de mediana 45.784 ms y un porcentaje de *outliers* de 21.67%. Al comparar los entornos de prueba se observa que el entorno no interferido presenta una mayor dispersión de los datos, sin embargo la caja y la mediana se encuentran por debajo las obtenidas para el entorno interferido, además de no presentar *outliers*, a diferencia del segundo caso

donde los valores atípicos constituyen gran parte de la muestra. Todo esto permite determinar que el escenario no interferido otorga mejores condiciones. Se determina así para la mediana una reducción del 56.92% en el escenario no interferido en comparación con el escenario interferido y para la media una reducción del 64.73%.

Figura 25

Delay. Escenario 2, protocolo UDP

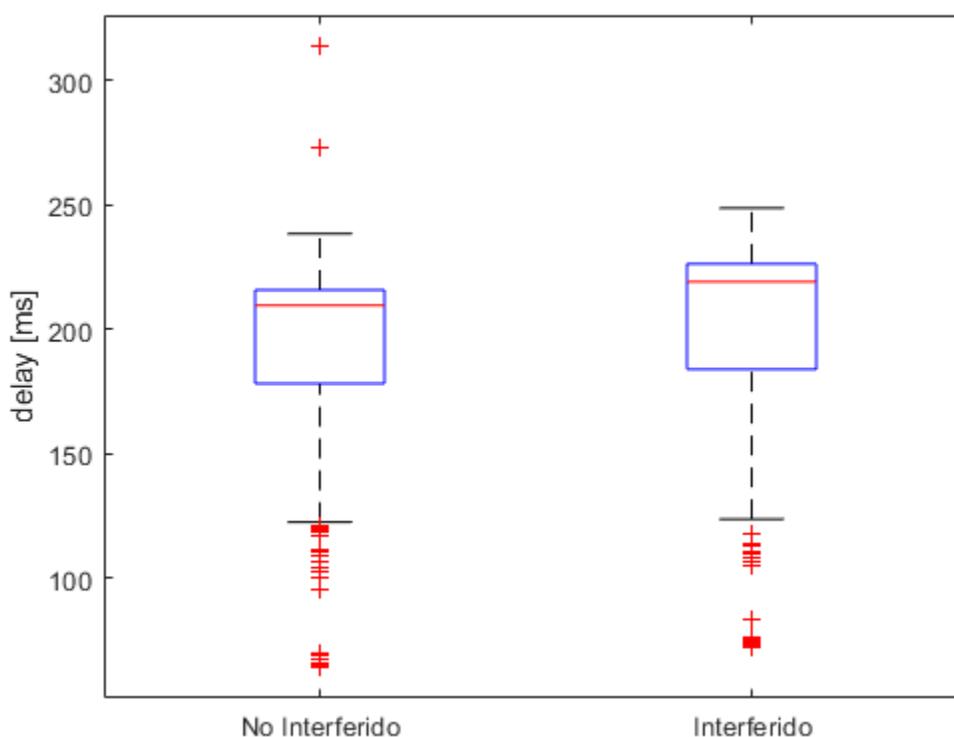


La Figura 26 presenta los datos del escenario Wave 2 con el uso del protocolo TCP. En el entorno no interferido se tiene una dispersión asimétrica negativa, de mediana 209.74 ms y un porcentaje de valores atípicos del 4.66%. Mientras que para el entorno interferido al igual que el anterior caso se tiene una asimetría negativa con mediana 219.31 ms y un 3.16% de *outliers*. Se puede apreciar que el entorno interferido presenta una inestabilidad ligeramente mayor al del entorno no interferido, sin embargo

es este segundo el que tiene un mayor número de valores atípicos los cuales se ubican por debajo de la caja. De acuerdo a los valores de mediana obtenidos se calcula en el entorno no interferido una reducción del retardo correspondiente al 4.36% respecto al interferido y al considerar los valores medios se presenta una reducción del 4.37%.

Figura 26

Delay. Escenario 2, protocolo TCP



Comparativa de Resultados Jitter

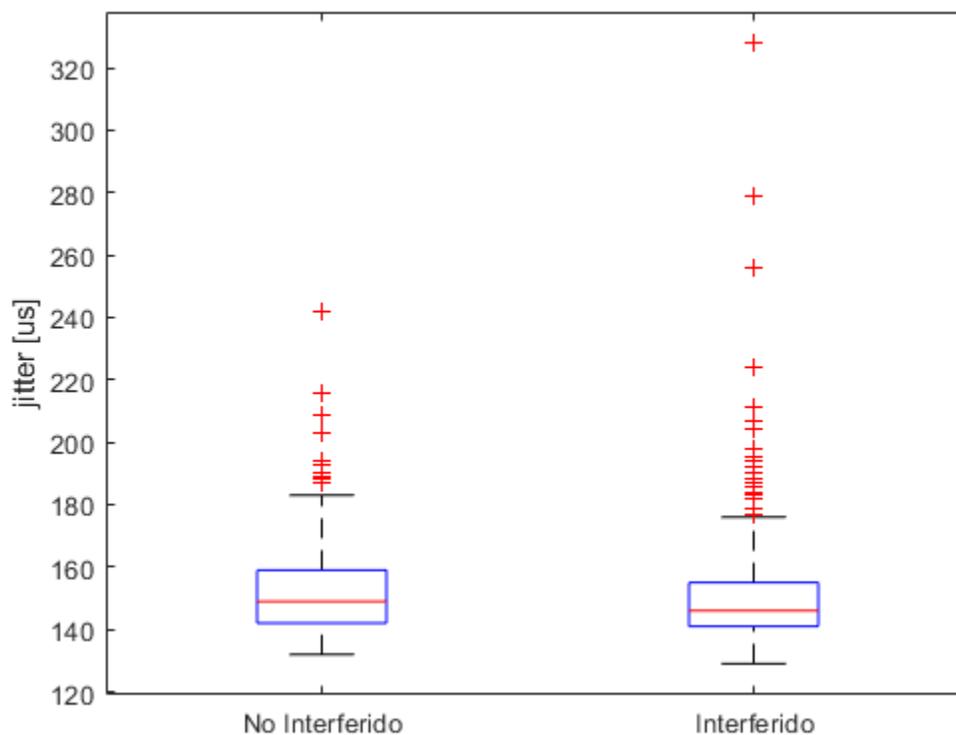
A continuación muestran los valores correspondiente al *jitter* en los distintos escenarios de prueba.

La Figura 27 muestra el diagrama de cajas y bigotes del escenario Wave 1 con el uso del protocolo UDP. En el entorno no interferido se tiene una dispersión asimétrica

positiva de mediana 149 us y un porcentaje de *outliers* correspondiente al 1.83%. Así mismo al evaluar el entorno interferido se determina una distribución de los datos con asimetría positiva con una mediana de 146 us y un porcentaje de 4.17% de valores atípicos. Si bien en este caso el valor de la mediana más bajo corresponde al escenario interferido, lo que determina en cual de los dos se tiene mejores condiciones es el número de valores atípicos y donde se ubican, por lo que al presentar un mayor número de *outliers* y que se ubican por encima de la caja, se puede decir que el escenario no interferido ofrecen mejores prestaciones. Se determina una diferencia porcentual en el *delay* del 2.05% entre ambos entornos de prueba en cuanto a los valores de mediana, mientras que para las medias se obtiene una diferencia del 1.07%.

Figura 27

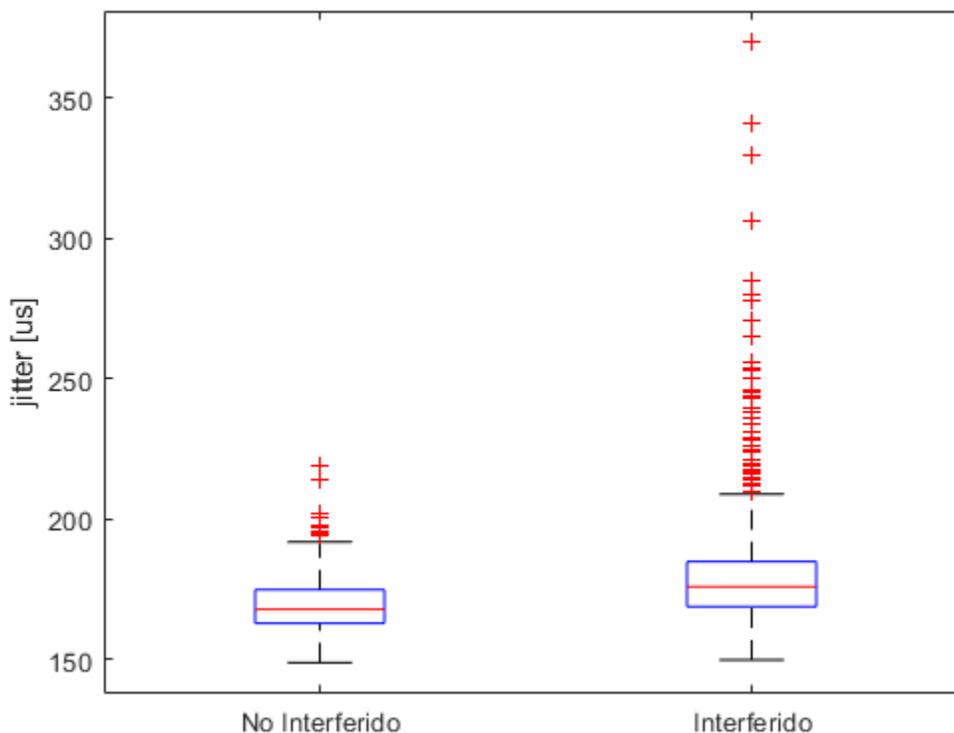
Jitter. Escenario 1, protocolo UDP



La Figura 28 presenta los datos del escenario Wave 1 con el protocolo TCP. En este escenario dentro de un entorno no interferido se determina una distribución asimétrica positiva de mediana 168 us y 2.5% de valores atípicos. En el entorno interferido se presenta una distribución con asimetría positiva con mediana 176 us y un porcentaje de *outliers* correspondiente al 8.33% de los datos. Se puede observar a simple vista que en el entorno interferido existe un mayor número de valores atípicos, mismos que se ubican por encima de la caja, esto indica que este escenario entrega peores resultados en comparación con el entorno no interferido. En este caso de acuerdo a los valores de mediana se tiene una reducción en el *delay* del 4.54% en el entorno no interferido respecto al interferido, por otro lado en base a los valores medios se determina una reducción del 6.22%.

Figura 28

Jitter. Escenario 1, protocolo TCP

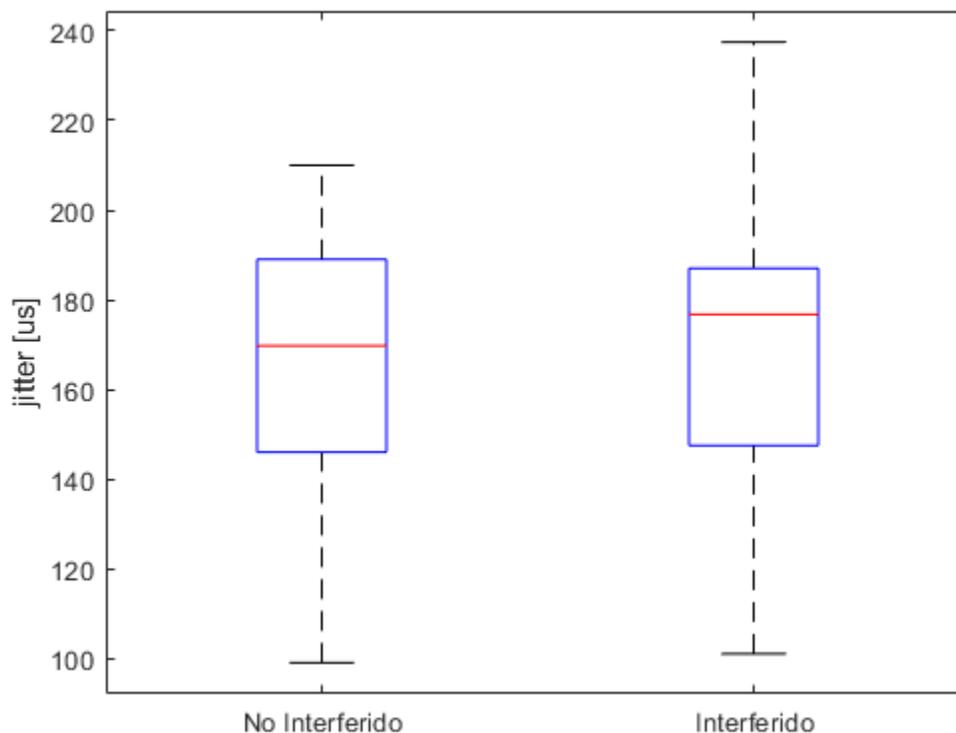


La Figura 29 indica los valores del escenario Wave 2 con el protocolo UDP. En el entorno no interferido se determina una distribución asimétrica negativa con mediana 169.75 us y un porcentaje de valores atípicos del 0%. En el entorno interferido se tiene una distribución asimétrica negativa al igual que en el caso anterior, con una mediana igual a 176.75 us y un 0% de *outliers* entre todas las muestras. Con los resultados obtenidos se puede observar cierta similitud entre las cajas, sin embargo tanto los valores máximo, mínimo y mediana en el entorno no interferido se encuentran por debajo de los obtenidos en el entorno interferido, con lo que se determina que se han obtenido mejores resultados en el entorno no interferido. En este caso al considerar los valores de mediana se tiene una reducción en el *jitter* del 3.96% y una reducción del

0.27% en los valores medios entre el escenario que no presenta interferencia respecto al que si se ve afectado por esta.

Figura 29

Jitter. Escenario 2, protocolo UDP

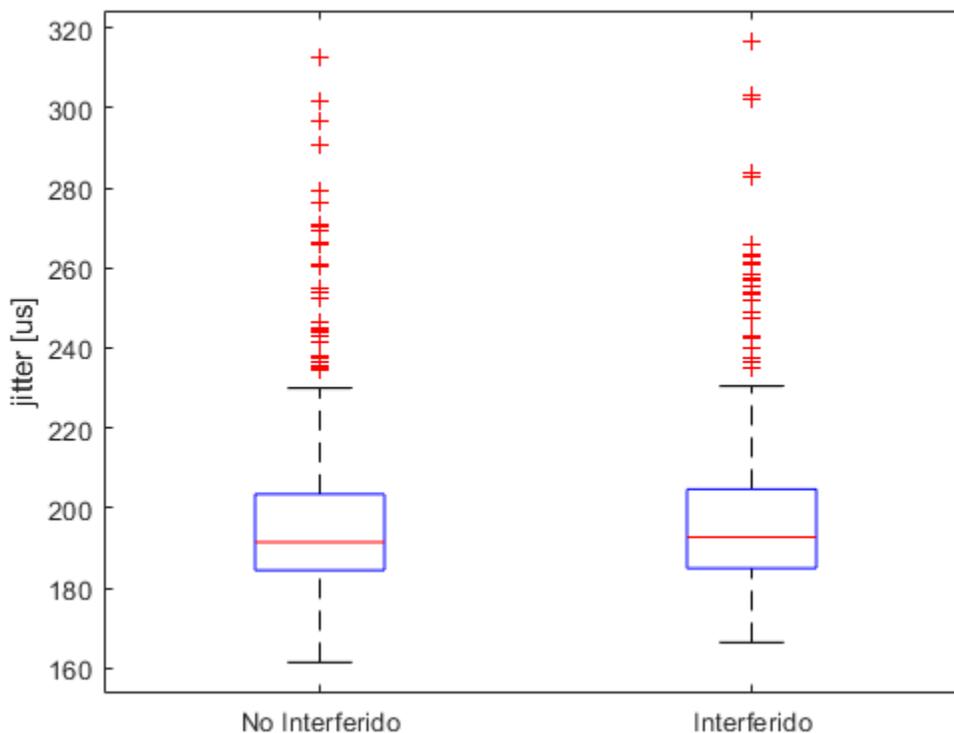


La Figura 30 muestra los resultados del escenario Wave 2 con el uso del protocolo TCP. Para el entorno no interferido se tiene una dispersión asimétrica positiva con mediana 191.5 us y un 5.5% de valores atípicos entre las muestras. En el entorno interferido se determina también una simetría positiva en la distribución de datos de mediana 192.75 us y un porcentaje igual al 5.17% de *outliers*. Las cajas en ambos casos presentan cierta similitud en cuanto a la anchura de las mismas, sin embargo el valor de la mediana para el entorno no interferido es menor que el del entorno interferido. En este escenario de prueba se tiene al considerar los valores de las

medianas una reducción del 0.64% en el *jitter* al comparar el escenario no interferido con el interferido, mientras que en base a los valores medios se obtiene una reducción del 2.07%.

Figura 30

Jitter. Escenario 2, protocolo TCP



Comparativa de Resultados Paquetes Perdidos

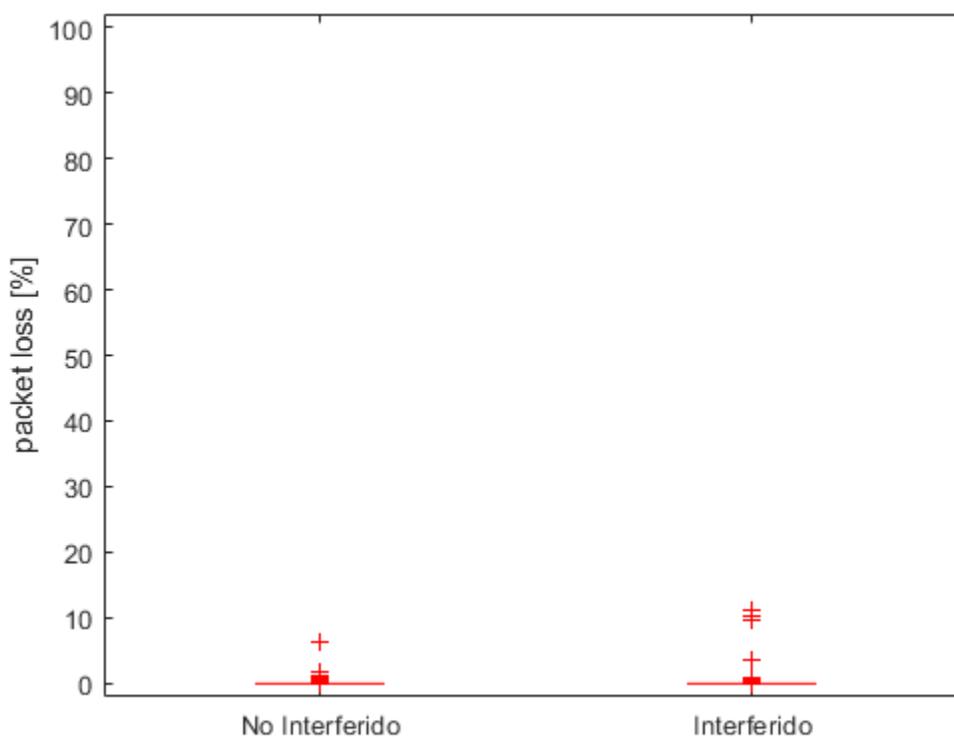
A continuación se muestran los valores correspondientes a los paquetes perdidos en los distintos escenarios de prueba.

La Figura 31 muestra los resultados del escenario Wave 1 con el uso del protocolo UDP. En el entorno no interferido así como también el interferido se observa que la mayoría de datos se concentran en el 0% de paquetes perdidos, el primer caso se obtiene un porcentaje del 18.17% de valores atípicos, mientras que al segundo

entorno le corresponde un 7.67% de *outliers*. En este caso pese a que el escenario no interferido presenta un mayor número de *outliers* también se destaca que solo una de las 600 muestras sobrepasa el rango del 5% de paquetes perdidos, mientras que en el escenario interferido 3 valores atípicos se ubican fuera de este rango, de cualquier manera en ambos casos la gran mayoría de las muestras se ubica bajo el umbral establecido lo que indica una baja cantidad de paquetes perdidos. Si se considera los valores medios obtenidos para estos entornos se determina que ambos presentan un porcentaje igual de paquetes perdidos, mientras que los valores de mediana se mantienen en 0 para ambos casos debido a que es ahí donde se concentran la mayoría de muestras.

Figura 31

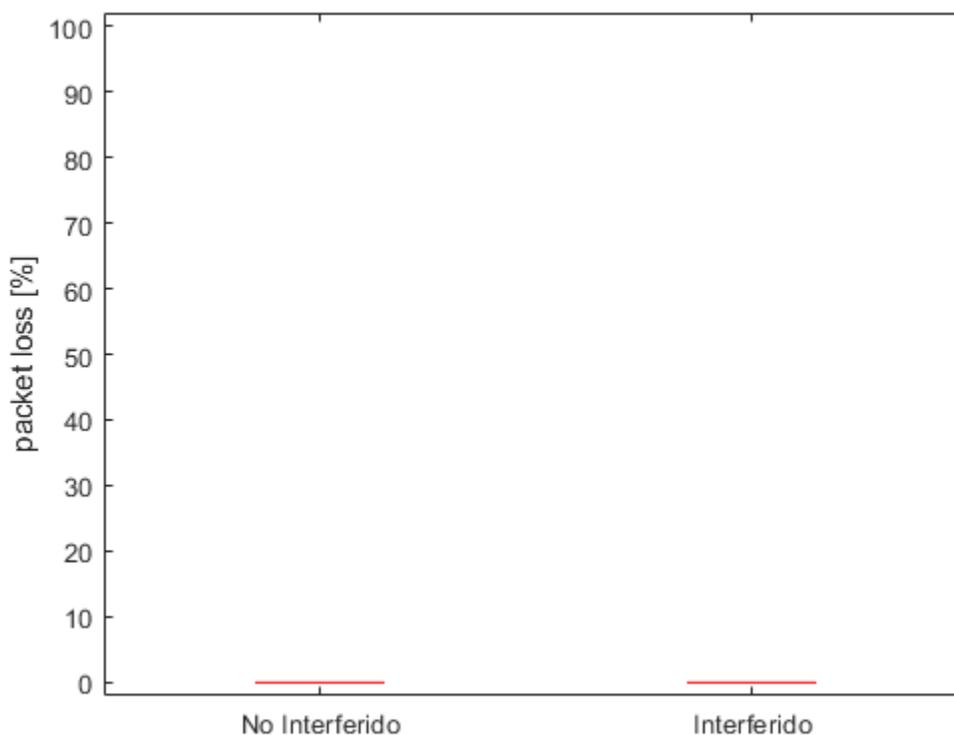
Paquetes perdidos. Escenario 1, protocolo UDP



La Figura 32 presenta los datos del escenario Wave 1 con el protocolo TCP, en este escenario para ambos entornos se observa que todos los datos se concentran en el 0% de paquetes perdidos, esto se debe a que al existir retransmisiones no se produce pérdida de paquetes. En este caso tanto para los valores de media y mediana se tiene un 0% de paquetes perdidos en los entornos interferido y no interferido.

Figura 32

Paquetes perdidos. Escenario 1, protocolo TCP

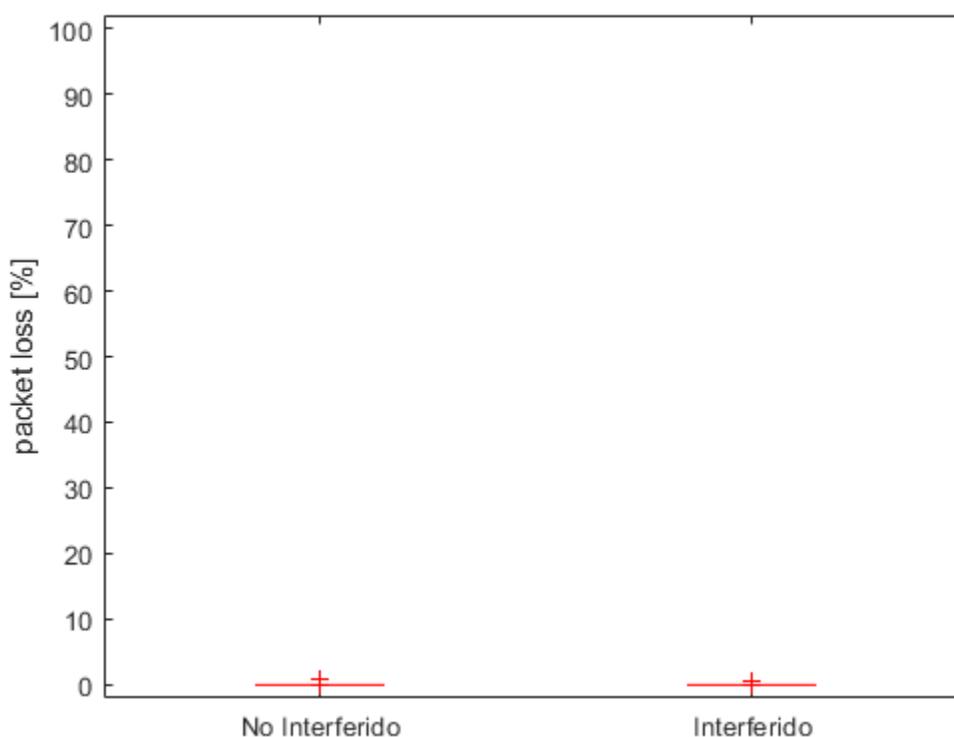


La Figura 33 indica los valores del escenario Wave 2 con el protocolo UDP. Se tiene así que en los entornos no interferido e interferido una gran cantidad de los valores de las muestras se agrupan en el 0% de paquetes perdidos, se determina que en el entorno no interferido existe un porcentaje de 11.17% de *outliers*, mientras que para el entorno interferido un total de 10.17% de los datos son valores atípicos. Se puede

observar que en ninguno de los dos entornos los *outliers* sobrepasan el rango de los 5% de paquetes perdidos permitido. Para este escenario los valores medios en ambos entornos son de 0% de paquetes perdidos, lo mismo ocurre al considerar los valores de las medianas puesto a que las muestras se concentran en el 0%.

Figura 33

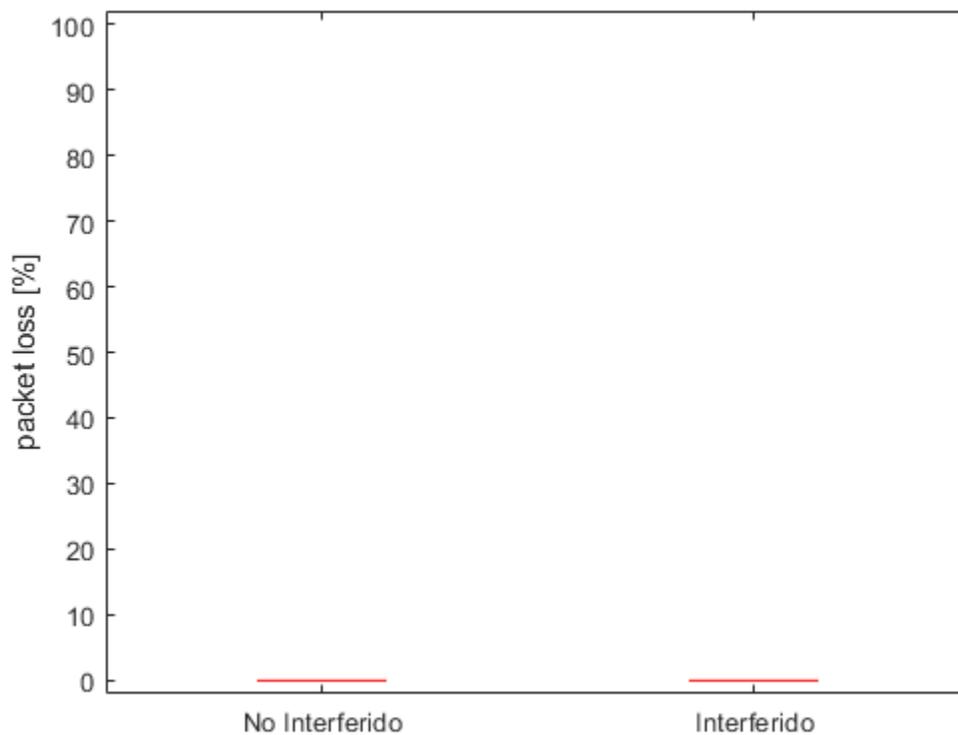
Paquetes perdidos. Escenario 2, protocolo UDP



La Figura 34 muestra los valores del escenario Wave 2 con el uso del protocolo TCP. Al igual que en el escenario Wave 1, la concentración de los datos en el 0% de paquetes perdidos se debe a las retransmisiones que garantizan la entrega de los paquetes sin pérdidas. Se presenta tanto para los valores de media y mediana y porcentaje del 0% de paquetes perdidos tanto para el entorno no interferido como para el interferido.

Figura 34

Paquetes perdidos. Escenario 2, protocolo TCP



Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos Futuros

Conclusiones

Con el estudio del estado del arte se recopiló información acerca de los estudios teórico, en simulación y *testbed* referentes a algunos de los estándares IEEE 802.11, esto permitió identificar al software D-ITG como la herramienta más idónea para las inyecciones de tráfico. Además, en base a la bibliografía se estableció un valor máximo del 5% de los paquetes perdidos para la transmisión de datos puesto a que no se trabaja con un tipo de aplicación específica.

Se implementó una red WLAN dentro de un edificio residencial, donde se utilizó un único router como AP, mientras que con los dos routers extra se generó la interferencia de tipo co-canal requerida para comparar los entornos interferidos respecto a los escenarios no interferidos, además el cálculo del radioenlace permitió determinar a través del modelo de pérdidas de propagación para ambientes interiores definido por la ITU-R un total de 51.61 dB de pérdidas para una distancia de 1.5 metros, así al realizar el presupuesto de potencia del enlace se calcularon potencias de recepción por debajo de los -30 dBm, dichas potencias definen el uso de un RBR de 433.3 Mbps para Wave 1 y 866.7 Mbps para Wave 2 de acuerdo a su relación con los índices de MCS.

Con las redes implementadas se realizaron las pruebas de inyección de tráfico para obtener las métricas asociadas a la QoS, sin embargo, debido a la limitación en las características técnicas respecto a la compatibilidad con la tecnología MU-MIMO en una de las suscriptoras, se ofrecieron dos soluciones diferentes de implementación de red: en el caso de Wave 1 se trabaja por completo con una red inalámbrica dado que para este escenario no se requiere hacer uso de la tecnología MU-MIMO al transmitir un único flujo espacial, por otro lado en el escenario propuesto para la fase Wave 2 se

utiliza el medio cableado en un segmento de la red entre la suscriptora que no dispone de la tecnología MU-MIMO y el AP, mientras que el segmento restante comprende una transmisión inalámbrica, en este segmento se aprovecha la capacidad de la tecnología MU-MIMO de enviar varios flujos espaciales de manera simultánea por lo que se transmitieron dos flujos, el máximo permitido por el AP.

A través de la técnica de inundación de tráfico se identificó la capacidad máxima del canal para las dos fases Wave del estándar IEEE 802.11ac, con lo que se determinó la cantidad y tamaño de paquetes a enviar en cada transmisión de modo que no se supere el porcentaje de paquetes perdidos del 5%. Se definió así para las inyecciones de tráfico una cantidad de 40000 paquetes por segundo con un tamaño de 2000 bytes, es decir 640 Mbps al transmitir un flujo y 1280 Mbps con dos flujos. Además el tamaño de las muestras recolectadas ofrece un nivel de confianza del 95% y un error de estimación del 4% con lo que se tiene una precisión que se ubica dentro de los rangos recomendados para el cálculo del tamaño de muestras infinitas.

Con el uso de la herramienta *boxplot* se establecieron a través de los diagramas de cajas y bigotes los aspectos más relevantes del conjunto de datos recolectado, estos son los valores de la mediana, valores atípicos y valores máximos y mínimos, además se pudo determinar el tipo de distribución que presentaba la caja para cada escenario y la dispersión de los datos dentro de la misma, esto permitió observar que en general el protocolo UDP ofrece mejores prestaciones respecto al protocolo TCP, la métrica que mejor permite notar esto es el retardo ya que el valor más bajo de *delay* con el uso del protocolo UDP se tiene en el escenario 1 en un entorno no interferido con un valor de 4.52 ms y el valor más alto corresponde al escenario 2 en un entorno interferido igual a 45.78 ms, mientras que con el protocolo TCP el valor de *delay* más bajo es 143.78 ms para el escenario 1 interferido y el valor más alto de esta métrica correspondiente al

escenario 2 interferido es de 219.31 ms, esto evidencia que el protocolo TCP se ve afectado por las retransmisiones que se realizan, aunque en contraste los paquetes no se pierden en las transmisiones como si ocurre con el protocolo UDP, esto permite concluir que el uso del protocolo TCP es más recomendable para aquellas aplicaciones que toleren tiempos de retardo por encima de los 250 ms pero que no admitan pérdidas en la información como puede ser el correo electrónico, por otro lado el uso protocolo UDP resulta más conveniente en aplicaciones que requieren tiempos de retardo reducidos por debajo de los 100 ms pero que acepten un cierto porcentaje de pérdidas en los paquetes recibidos, estas pueden ser VoIP o aplicaciones de *streaming*.

A través del cálculo de los valores medios de las muestras obtenidas para cada métrica y escenario se determinó al delay como el principal parámetro que permite identificar la degradación del servicio entre los entornos no interferidos e interferidos, esto es más notorio principalmente en los escenarios donde se trabaja con el protocolo UDP, ya que para el escenario 1 se tiene una reducción del 76.99% de delay en el entorno no interferido respecto al interferido, mientras que para el escenario 2 se calcula una reducción del 64.73% al comparar dichos escenarios, con esto se evidencia que los entornos no interferidos presentan mejores condiciones para las transmisiones en comparación con los entornos que si se ven afectados por la presencia de la interferencia de tipo co-canal.

Dado que se define al *throughput* normalizado como la principal medida de la eficiencia, los resultados obtenidos permiten identificar que la fase Wave 1 del estándar IEEE 802.11ac ofrece un mejor desempeño en cada uno de los escenarios propuestos en comparación con los escenarios de la fase Wave 2, se tiene así que el escenario en el cual se identifica el mejor rendimiento para Wave 1 es el escenario 1 no interferido con el uso del protocolo TCP en el que se determina un *throughput* normalizado igual a

0.4208 de mediana y de 0.4179 de media, mientras que para Wave 2 el escenario con mejor desempeño es el escenario 2 no interferido con el uso del protocolo UDP donde se obtienen valores de *throughput* de 0.3624 de mediana y 0.3605 de media, esto indica una reducción en el desempeño del 5.84% y 5.74% para la fase Wave 2 respecto a Wave 1 de acuerdo a los valores de mediana y media, además se identificó una reducción en la eficiencia de los entornos interferidos respecto a los no interferidos del 1.18% para UDP y 1.89% para TCP para Wave 1, mientras que para Wave 2 se tiene una reducción del 0.42% con UDP y 0.31% para TCP lo cual indica que MU-MIMO es más efectivo frente a las interferencias.

Trabajos Futuros

El grupo de investigación plantea realizar un análisis similar al del presente estudio en ambientes exteriores donde se pueda identificar como se ve afectado el rendimiento de la tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11ac en estos entornos y determinar cuál es la distancia máxima alcanzada para establecer un enlace entre el AP y las suscriptoras, donde se mantengan parámetros de QoS acorde a lo esperado.

Se propone un estudio comparativo del estándar IEEE 802.11ac donde se evalúen diferentes tipos de datos a nivel de capa de aplicación en las inyecciones de tráfico a través de D-ITG como puede ser VoIP o IPTV.

El grupo de trabajo se interesa en realizar un estudio comparativo entre el estándar IEEE 802.11ac y el estándar IEEE 802.11ax en diferentes entornos para determinar a través de las métricas de desempeño asociadas a la QoS cuál de los dos estándares inalámbricos ofrece un mejor rendimiento.

Se propone la evaluación del rendimiento del estándar IEEE 802.11ac al transmitir un mayor número de flujos espaciales de manera simultánea y determinar si la tecnología MU-MIMO permite llegar a las cuotas de eficiencia descritas en la teoría y en estudios similares.

Referencias

- Alvarez Marchán, M. V. (2013). *Análisis de la interferencia provocada por cámaras inalámbricas de video a 2,4 GHz en la coexistencia con redes WLAN* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4054>
- Arias Guadarrama, P. (2005). *Clasificación de Redes de Telecomunicaciones Alámbricas e Inalámbricas* [Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].
<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/525>
- Cabarcas Martínez, A., & Marrugo Catro, A. (2008). *Diseño y arquitectura de redes WAN* [Universidad Tecnológica de Bolívar].
<http://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/1361>
- Cano D., I. E., & Almeida G., F. D. (2012). *Análisis del desempeño de una red con tecnología wi-fi para largas distancias en la región costa del Ecuador* [Universidad de las Fuerzas Armadas]. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5710/1/T-ESPE-034113.pdf>
- Criollo Bustamante, M. D. (2010). *Análisis comparativo de los protocolos 802.11n, 802.11g y 802.3; en el proceso técnico de integración departamental: Caso práctico municipio de Cumandá* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3630>
- Daldoul, Y., Meddour, D. E., & Ksentini, A. (2018). IEEE 802.11n/ac Data Rates under Power Constraints. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422697>
- Escudero Pascual, A. (2007). *Estándares en Tecnologías Inalámbricas*. Asociación Civil

Nodo TAU.

- Fernandez, C., & Lara-Cueva, R. (2016). Análisis del desempeño en un enlace descendente de redes basadas en los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11n y WDS. *RECI Revista Iberoamericana de Las Ciencias Computacionales e Informática*, 5(10), 1–19. <https://doi.org/10.23913/reci.v5i10.42>
- García Fernández, A., Pina Amargós, J. D., & Leyva Pérez, E. C. (2007). *Estado del arte de las redes inalámbricas*. 28(3), 50–56. <https://www.redalyc.org/pdf/3604/360433564001.pdf>
- Gil, P., Pomares, J., & Candelas, F. (2010). *Redes y Transmisión de Datos*. Universidad de Alicante.
- Herrera Herrera, H. M. (2018). *Modelo de optimización de rendimiento en redes 802.11ac utilizando programación multi-objetivo* [Universidad Distrital Francisco José De Caldas]. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/14493/1/HerreraHerreraHectorManuel2019.pdf>
- Huidobro, J. M. (2014). *Telecomunicaciones, Tecnología, Redes Y Servicios* (2nd ed.). RA-MA.
- Huidobro Moya, J. M. (2006). *Redes y Servicios de Telecomunicaciones* (4th ed.). Paraninfo.
- Lara-Cueva, R., Morales, C., & Fernandez, C. (2017). Performance evaluation of WiFi technology in conformance with IEEE 802.11b/n/ac and WDS for indoor environments. *2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing COLCOM*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2017.8088191>

- Llugsi, R., Llangarí, F., & Mejía, E. (2017). *Estudio , Pruebas y Simulación del Estándar IEEE 802.11ac Basándose en MU-MIMO (MIMO Multiuser)*. 27, 263–271.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15072>
- López Barnés, R. (2008). *Red Basada en acceso inalámbrico (WiFi & WiMAX)*
[Universidad Autónoma de Madrid]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/9950>
- López López, D. G. (2018). *Evaluación del estándar IEEE 802.11ac con tecnología mu-mimo en comparación al estándar de fibra óptica en redes de transporte de datos*
[Universidad Técnica de Ambato].
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28008>
- Meden Peralta, A. J. (2013). *IEEE 802.11ac*. <http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/80211ac.pdf>
- Mero García, S. Á. (2017). *Estudio y diseño de una red inalámbrica utilizando el estándar 802.11 ac. (Caso de estudio UTM)* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13687>
- Mills, D. L. (1991). Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol. *IEEE Transactions on Communications*, 39(10), 1482–1493.
<https://doi.org/10.1109/26.103043>
- Molina Fernández de Castro, F. J. (2003). *Redes PAN Basadas en Bluetooth*
[Universidad Tecnológica de Bolívar].
<http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0023964.pdf>
- Naso, C. (2012). *Evoluzione dello standard IEEE 802.11 (WiFi): verso IEEE 802.11ac*.
<http://tesi.cab.unipd.it/42079/>
- Oliver, M., & Escudero, A. (1999). *Redes de área local inalámbricas según el estándar*

- IEEE 802.11. *Buran*, 19–24. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/9922>
- Ortiz Puga, D. A. (2015). *Análisis comparativo del desempeño del estándar IEEE 802.11ac respecto al IEEE 802.11n a través de simulación numérica apoyada por software* [Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10181>
- Ramón Ramirez, L. (2015). *Sistemas de Radiocomunicaciones*. Paraninfo.
- Salazar, J. (2016). *Redes Inalámbricas*. European Virtual Learning Platform for Electrical and Information Engineering. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100918>
- Santos Gonzáles, M. (2014). *Diseño de redes telemáticas* (1st ed.). Ra-Ma S.A.
- Scricca Yanes, L. A. (2013). *Planificación De Redes LTE* [Universidad Politécnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/22008/>
- Torres, J., Pinto-Mangones, Á., Macea A, M., Pérez-García, N., & Rujano, L. M. (2016). Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 GHz y 5,8 GHz, para ambientes interiores de edificios comerciales. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 20(78), 42–53.
- Vallejo-Baldeon, M. A., Rodriguez, D. N., & Lara-Cueva, R. A. (2017). Performance evaluation of wireless network in conformance with IEEE 802.11n in co-channel interference scenarios. *2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2017.8088188>
- Vallejo Baldeón, M. A. (2016). *Evaluación de desempeño del estándar IEEE 802.11n, en un ambiente de laboratorio. Caso de estudio ESPE* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13137>
- Vicente Jaramillo, M. (2015). *Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar*

802.11ac [Universidad de Sevilla].

[https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/35062/TFG María Vicente Jaramillo.pdf?sequence=1](https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/35062/TFG_María_Vicente_Jaramillo.pdf?sequence=1)

Zapata Rodríguez, M., Pacheco Chiguano, F., De la Torre, E., & Vallejo Baldeón, M.

(2017). Evaluación de Parámetros de QoS en una Red VPN-MPLS Diffserv bajo un Entorno Completo de Emulación de Software Libre. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 74–82. <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i3.285>

Zuñiga Lopez, V. (2005). *Redes De Transmision De Datos* [Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].

[http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/redes de transmision de datos.pdf](http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/redes_de_transmision_de_datos.pdf)

Alvarez Marchán, M. V. (2013). *Análisis de la interferencia provocada por cámaras inalámbricas de video a 2,4 GHz en la coexistencia con redes WLAN* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4054>

Arias Guadarrama, P. (2005). *Clasificación de Redes de Telecomunicaciones Alámbricas e Inalámbricas* [Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].

<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/525>

Cabarcas Martínez, A., & Marrugo Catro, A. (2008). *Diseño y arquitectura de redes WAN* [Universidad Tecnológica de Bolívar].

<http://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/1361>

Cano D., I. E., & Almeida G., F. D. (2012). *Análisis del desempeño de una red con*

tecnología wi-fi para largas distancias en la región costa del Ecuador [Universidad

de las Fuerzas Armadas]. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5710/1/T->

ESPE-034113.pdf

Criollo Bustamante, M. D. (2010). *Análisis comparativo de los protocolos 802.11n, 802.11g y 802.3; en el proceso técnico de integración departamental: Caso práctico municipio de Cumandá* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

<http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/3630>

Daldoul, Y., Meddour, D. E., & Ksentini, A. (2018). IEEE 802.11n/ac Data Rates under Power Constraints. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422697>

Escudero Pascual, A. (2007). *Estándares en Tecnologías Inalámbricas*. Asociación Civil Nodo TAU.

Fernandez, C., & Lara-Cueva, R. (2016). Análisis del desempeño en un enlace descendente de redes basadas en los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11n y WDS. *RECI Revista Iberoamericana de Las Ciencias Computacionales e Informática*, 5(10), 1–19. <https://doi.org/10.23913/reci.v5i10.42>

García Fernández, A., Pina Amargós, J. D., & Leyva Pérez, E. C. (2007). *Estado del arte de las redes inalámbricas*. 28(3), 50–56.

<https://www.redalyc.org/pdf/3604/360433564001.pdf>

Gil, P., Pomares, J., & Candelas, F. (2010). *Redes y Transmisión de Datos*. Universidad de Alicante.

Herrera Herrera, H. M. (2018). *Modelo de optimización de rendimiento en redes 802.11ac utilizando programación multi-objetivo* [Universidad Distrital Francisco José De Caldas].

<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/14493/1/HerreraHerreraHectorMa>

nuel2019.pdf

Huidobro, J. M. (2014). *Telecomunicaciones, Tecnología, Redes Y Servicios* (2nd ed.).

RA-MA.

Huidobro Moya, J. M. (2006). *Redes y Servicios de Telecomunicaciones* (4th ed.).

Paraninfo.

Lara-Cueva, R., Morales, C., & Fernandez, C. (2017). Performance evaluation of WiFi technology in conformance with IEEE 802.11b/n/ac and WDS for indoor environments. *2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing COLCOM*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2017.8088191>

Llugsí, R., Llangarí, F., & Mejía, E. (2017). *Estudio , Pruebas y Simulación del Estándar IEEE 802.11ac Basándose en MU-MIMO (MIMO Multiuser)*. 27, 263–271.

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15072>

López Barnés, R. (2008). *Red Basada en acceso inalámbrico (WiFi & WiMAX)*

[Universidad Autónoma de Madrid]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/9950>

López López, D. G. (2018). *Evaluación del estándar IEEE 802.11ac con tecnología m-
mimo en comparación al estándar de fibra óptica en redes de transporte de datos*

[Universidad Técnica de Ambato].

<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28008>

Meden Peralta, A. J. (2013). *IEEE 802.11ac*. [http://jeuazarru.com/wp-](http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/80211ac.pdf)

[content/uploads/2014/10/80211ac.pdf](http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/80211ac.pdf)

Mero García, S. Á. (2017). *Estudio y diseño de una red inalámbrica utilizando el*

estándar 802.11 ac. (Caso de estudio UTM) [Pontificia Universidad Católica del

Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13687>

Mills, D. L. (1991). Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol. *IEEE Transactions on Communications*, 39(10), 1482–1493.

<https://doi.org/10.1109/26.103043>

Molina Fernández de Castro, F. J. (2003). *Redes PAN Basadas en Bluetooth* [Universidad Tecnológica de Bolívar].

<http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0023964.pdf>

Naso, C. (2012). *Evoluzione dello standard IEEE 802.11 (WiFi): verso IEEE 802.11ac*.

<http://tesi.cab.unipd.it/42079/>

Oliver, M., & Escudero, A. (1999). Redes de área local inalámbricas según el estándar IEEE 802.11. *Buran*, 19–24. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/9922>

Ortiz Puga, D. A. (2015). *Análisis comparativo del desempeño del estándar IEEE 802.11ac respecto al IEEE 802.11n a través de simulación numérica apoyada por software* [Universidad Politécnica Salesiana].

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10181>

Ramón Ramirez, L. (2015). *Sistemas de Radiocomunicaciones*. Paraninfo.

Salazar, J. (2016). *Redes Inalámbricas*. European Virtual Learning Platform for Electrical and Information Engineering. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100918>

Santos Gonzáles, M. (2014). *Diseño de redes telemáticas* (1st ed.). Ra-Ma S.A.

Scricca Yanes, L. A. (2013). *Planificación De Redes LTE* [Universidad Politécnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/22008/>

Torres, J., Pinto-Mangones, Á., Macea A, M., Pérez-García, N., & Rujano, L. M. (2016).

Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 GHz y 5,8 GHz, para ambientes interiores de edificios

comerciales. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 20(78), 42–53.

Vallejo-Baldeon, M. A., Rodriguez, D. N., & Lara-Cueva, R. A. (2017). Performance evaluation of wireless network in conformance with IEEE 802.11n in co-channel interference scenarios. *2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2017.8088188>

Vallejo Baldeón, M. A. (2016). *Evaluación de desempeño del estándar IEEE 802.11n, en un ambiente de laboratorio. Caso de estudio ESPE* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13137>

Vicente Jaramillo, M. (2015). *Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar 802.11ac* [Universidad de Sevilla].

[https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/35062/TFG María Vicente Jaramillo.pdf?sequence=1](https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/35062/TFG%20María%20Vicente%20Jaramillo.pdf?sequence=1)

Zapata Rodríguez, M., Pacheco Chiguano, F., De la Torre, E., & Vallejo Baldeón, M. (2017). Evaluación de Parámetros de QoS en una Red VPN-MPLS Diffserv bajo un Entorno Completo de Emulación de Software Libre. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 74–82. <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i3.285>

Zuñiga Lopez, V. (2005). *Redes De Transmision De Datos* [Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. [http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/redes de transmision de datos.pdf](http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/redes%20de%20transmision%20de%20datos.pdf)

Anexos