



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Maestría en Telecomunicaciones

Evaluación del desempeño del estándar 802.11ad (60 GHz) para enlaces de backbone para distancias cortas en ambientes con LOS (línea de vista).

Trabajo de Titulación previo a la
obtención del título de Magíster en
Telecomunicaciones

AUTOR:

Robert Iván Loarte Caraguay

DIRECTOR:

Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 15 de mayo de 2023

Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Evaluación del desempeño del estándar 802.11ad (60 GHz) para enlaces de backbone para distancias cortas en ambientes con LOS (línea de vista).**, previo a la obtención del título **de Magíster en Telecomunicaciones**, de la autoría del estudiante **Robert Iván Loarte Caraguay** , con **cédula de identidad N° 1104149578**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

**JUAN
GABRIEL
OCHOA
ALDEAN**

Firmado
digitalmente por
JUAN GABRIEL
OCHOA ALDEAN
Fecha: 2023.06.16
18:24:57 -05'00'

Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, Robert Iván Loarte Caraguay, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de Identidad: 1104149578

Fecha: 16-05-2023

Correo electrónico: robert.loarte@gmail.com

Teléfono: 0967034717

Carta de autorización por parte del autor para la consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo del trabajo de Titulación.

Yo, **Robert Iván Loarte Caraguay**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado **Evaluación del desempeño del estándar 802.11ad (60 GHz) para enlaces de backbone para distancias cortas en ambientes con LOS (línea de vista)**., como requisito para optar el título de **Magíster en Telecomunicaciones**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los dieciséis días del mes de mayo de dos mil veintitrés.

Firma: 

Autor: Robert Iván Loarte Caraguay

Cédula de identidad: 1104149578

Dirección: Belén

Correo Electrónico: robert.loarte@unl.edu.ec

Teléfono: 0967034717

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc.

Dedicatoria

Dedico este Trabajo de Titulación a mi familia por apoyarme y estar junto a mí en cada momento de mi vida y permitirme estudiar y desarrollar mis habilidades.

Robert Iván Loarte Caraguay

Agradecimiento

A los docentes de la Maestría de Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja por compartir sus conocimientos y consejos para lograr mi formación como magister.

A todos mis amigos y compañeros de maestría y trabajo con quienes me he desarrollado profesional y académicamente.

Robert Iván Loarte Caraguay

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Carta de autorización	iv
Agradecimiento	vi
Índice de Contenidos	vii
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	x
Índice de anexos	xii
1. Título 1	
2. Resumen	2
2.1. Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1. Evolución del estándar IEEE 802.11.	6
4.1.1. IEEE 802.11a y 802.11b.	6
4.1.2. IEEE 802.11g.....	6
4.1.3. IEEE 802.11n.	7
4.1.4. IEEE 802.11ac	7
4.1.5. IEEE 802.11ax	7
4.2. Estándar IEEE 802.11 ad.....	7
4.3. Capacidad del estándar 802.11ad	8
4.4. Características de las ondas milimétricas.	9
4.5. Espectro radioeléctrico.	9
4.6. Hardware disponible actualmente	11
4.7. Comparación entre la banda 2.4 GHz, 5 GHz y 60 GHz.....	12
5. Metodología	14

5.1 Contexto.....	14
5.2 Proceso.....	14
5.3 Recursos.....	15
6. Resultados.	16
6.1. Objetivo 1: Realizar un estudio del estándar 802.11ad (60 GHz) para conocer el hardware disponible actualmente	16
6.2. Objetivo 2: Analizar el rendimiento de equipos con tecnología 802.11ad como enlaces de backbone para la transmisión de grandes cantidades de datos en entornos abiertos.	19
6.2.1. Análisis matemático para el presupuesto de Enlace	19
6.3. Objetivo 3: Examinar el throughput que manejan los equipos en 60 Ghz y su diferencia con el estándar 5 GHz para determinar ventajas y desventajas de ambos estándares.	44
7. Discusión	51
8. Conclusiones.	53
9. Recomendaciones.	54
10. Bibliografía	55
11. Anexos.	58

Índice de Tablas:

Tabla 1. Normas ITU del estándar IEEE 802.11ad	10
Tabla 2. Comparación entre las bandas 2.4, 5 y 60 GHz	12
Tabla 3. Chipset inalámbricos 60 GHz ad.....	17
Tabla 4. Comparativa de modelos del fabricante Mikrotik.....	18
Tabla 5. Comparativa de modelos del fabricante Ubiquiti.....	19
Tabla 6. Equipo Transmisor	20
Tabla 7. Equipo Receptor.....	20
Tabla 8. Cálculos de pérdida de espacio libre según la distancia.....	21
Tabla 9. Cálculos.....	23
Tabla 10. Resultados pruebas de laboratorio de velocidad de transmisión.....	34
Tabla 11. Esquema de modulación y la sensibilidad de recepción	41
Tabla 12. Características equipo Mikrotik cube_60pro_ac.....	46
Tabla 13. Comparativa de tasa de transmisión entre el estándar 802.11 ac y el estándar 802.11ad.....	49

Índice de Figuras:

Figura 1. Evolución del estándar IEEE 802.11	6
Figura 2. Throughput de un enlace de 60 GHz con la relación a la distancia de enlace	9
Figura 3. Países de la región 2 en donde las frecuencias de 57 a 64 GHz no son licenciados.	10
Figura 4. Disponibilidad de tecnología en el mercado actual	11
Figura 5. Disponibilidad de tecnología en 60 GHz para enlaces de corta alcance.....	12
Figura 6. Gráfico de atenuación	24
Figura 7. Atenuación específica por lluvia.....	25
Figura 8. Torre de telecomunicaciones ubicado en el cerro villonaco	27
Figura 9. Banco de paneles solares para mantener operativo el equipamiento de backbone y la red de acceso	27
Figura 10. Ubicación de la torre de telecomunicaciones en el sector llamado Lolita Samaniego.....	28
Figura 11. Línea de vista (LOS) desde Lolita Samaniego hasta el cerro Villonaco	29
Figura 12. Capacidad de enlace y distancia calculada en 1.85 Km.....	29
Figura 13. Instalación del equipo 60 GHz en el cerro Villonaco	30
Figura 14. Equipo TX con el estándar 802.11ad.....	30
Figura 15. Perspectiva desde el sector Lolita Samaniego hasta el cerro Villonaco	31
Figura 16. Configuración del equipo TX en 60 GHz.....	32
Figura 17. Configuración de la estación en 60 GHz	32
Figura 18. Estatus del enlace en 60 GHz	33
Figura 19. Velocidad <i>de descarga</i>	34
Figura 20. Latencia de enlace hacia el equipo core.....	35
Figura 21. Carga de CPU de equipo TX	35
Figura 22. Carga de CPU de equipo RX	35
Figura 23. Velocidad de subida.....	36

Figura 24. Latencia de subida	36
Figura 25. Carga de CPU	36
Figura 26. Test de velocidad de bajada con el protocolo TCP.....	37
Figura 27. Velocidad de bajada promedio de 715.9 Mbps.....	37
Figura 28. Carga de CPU con velocidad de descarga	38
Figura 29. Resultados, velocidad de subida	38
Figura 30. Tiempo de latencia hacia Internet.....	39
Figura 31. Velocidades simétricas (descarga y subida) con el protocolo UDP	39
Figura 32. Velocidad simétrica con el protocolo TCP.....	40
Figura 33. Carga de CPU con velocidades simétricas con el protocolo TCP	40
Figura 34. <i>Capacidad física y sensibilidad de recepción de acuerdo a la modulación.</i>	42
Figura 35. Estabilidad de la modulación durante determinado tiempo sin interferencia	42
Figura 36. Sensibilidad de recepción y modulación máxima durante lluvia moderada.....	43
Figura 37. Inestabilidad de enlace por atenuación específica de lluvia.	43
Figura 38. Indisponibilidad de enlace por factores atmosféricos.....	44
Figura 39. Protocolo UDP.....	45
Figura 40. Tráfico de carga y descarga en TCP	45
Figura 41. Velocidad de descarga en la banda de 60 GHz.....	46
Figura 42. Configuración de parámetros.....	47
Figura 43. Verificación de la calidad de enlace entre el transmisor y receptor	47
Figura 44 . Verificación de consumo de CPU.....	48
Figura 45 . Test de velocidad en la banda de 5 GHz.....	48
Figura 46 . Verificación de enlace no factible para el servicio de Internet.....	49

Índice de Anexos:

Anexo 1. Data Sheet airFiber 60 LR.....	58
Anexo 2. Recomendación UIT-R P.838-3, Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción.....	59
Anexo 3. Data Sheet Equip Mikrotik 60 GHz	60
Anexo 4. Certificado de traducción del Abstract	62

1. Título

Evaluación del desempeño del estándar 802.11ad (60 GHz) para enlaces de backbone para distancias cortas en ambientes con LOS (línea de vista).

2. Resumen

Las redes inalámbricas han sido de gran ayuda para conectar zonas de difícil acceso, así como ofrecer conectividad inalámbrica a la gran cantidad de dispositivos que existen hoy en día, como celulares, consolas de juego dispositivos IoT, asistentes de voz.

En la actualidad existen grandes avances en el campo tecnológico, tomando en cuenta esto, en las redes de telecomunicaciones cada día surgen nuevos métodos de conexión y estándares para facilitar el acceso a datos e Internet.

En este sentido las ondas milimétricas que trabaja en la banda de 60 GHz, que se encuentra en el estándar 802.11ad permiten la transferencia de una gran cantidad de información de forma inalámbrica, cuando exista línea de vista y se encuentra a una distancia corta, dependiendo de las especificaciones técnicas del hardware a utilizar.

En base a ello, el objetivo del presente TT es analizar la tecnología disponible actualmente en el mercado como marcas, tipos de antena, detalles técnicos de equipos para enlaces de punto a punto que se encuentren disponibles en el país. Se elegirán los equipos que nos permitirán realizar un enlace punto a punto a una determinada distancia y realizar pruebas de enlace como latencia, tráfico de subida/bajada y capacidad de procesamiento.

La instalación de estos equipos se realizara en entornos ambientales abiertos que permitirán evaluar el rendimiento y capacidad de enlace cuando existan interferencias por lluvia esto debido a que las ondas milimétricas por su naturaleza son muy susceptibles a interferencias por este tipo de fenómenos.

Palabras Clave: Comunicaciones inalámbricas., Redes de datos, Ondas milimétricas, 60 GHz.

2.1. Abstract

Wireless networks have been of great help to connect areas of difficult access, as well as to offer wireless connectivity to the large number of devices that exist today, such as cell phones, game consoles, IoT devices and voice assistants.

Currently there are great advances in the technological field, taking into account this, in telecommunications networks every day new connection methods and standards emerge to facilitate access to data and Internet.

In this sense, the millimeter waves that work in the 60 GHz band, found in the 802.11ad standard, allow the transfer of a large amount of information wirelessly, when there is line of sight and it is at a short distance, depending on the technical specifications of the hardware to be used.

Based on this, the objective of this TT is to analyze the technology currently available in the market as brands, antenna types, technical details of equipment for point to point links that are available in the country. We will choose the equipment that will allow us to perform a point to point link at a certain distance and perform link tests such as latency, up/down traffic and processing capacity.

The installation of this equipment will be done in open environmental settings that will allow us to evaluate the performance and link capacity when there is interference due to rain, because millimeter waves by their nature are very susceptible to interference by this type of phenomena.

Keywords: Wireless communications, Data networks, Millimeter waves, 60 GHz

3. Introducción

El desarrollo de estándares para conexiones inalámbricas ha evolucionado de manera vertiginosa en los últimos años, así como el incremento de dispositivos inalámbricos como smartphone, tablets, dispositivos IoT, esto ha hecho que la utilización de wifi sea imprescindible para su conexión hacia Internet o entre dispositivos.

Los estándares actuales en los que trabajan los dispositivos móviles se encuentra el WIFI 5, conocidos como 802.11ac y actualmente en equipos nuevos incorporando WIFI 6 o 802.11ax, si bien estos estándares han incrementado la velocidad de Internet por WIFI, la saturación del espectro con las trabajan estos estándares, bajo la banda de 5 GHz ha depreciado la conexión inalámbrica, por lo que no es posible su utilización para la transmisión de videos 4K o juegos en línea.

El desarrollo de estándares como el IEEE 82.11ad y 802.11ay también conocidos como WIGig (Wireless Gigabit) están desarrollados para evitar los problemas de WIFI como la saturación por el espectro radioeléctrico y cuyo objetivo es transmitir cantidades grandes de información de manera inalámbrica hasta llegar a los 8 Gbps, dependiendo del hardware que se utilice así como la distancia entre el equipo transmisor y el equipo receptor.

El presente trabajo está compuesto de las siguientes secciones: en el Marco Teórico se encuentran los conceptos y definiciones necesarias para la comprensión del TT; continúa con la Metodología en donde se detalla el proceso para cumplir con cada uno de los objetivos y sus productos entregables.

A continuación, se encuentra la sección de Resultados en donde se explican los entregables desarrollados para solucionar cada objetivo específico, partiendo desde el análisis del hardware como antenas y productos desarrollados en el estándar 802.11ad y que operen conjuntamente con los estándar WIFI que se conoce actualmente como el 802.11 n/ac y que estos se encuentren disponibles en el país.

Se realiza la implementación de enlace en la banda de 60 GHz ubicado en el cantón Loja, desde el sector Lolita Samaniego (Carigan) en donde se encuentra ubicado el equipos transmisor y el sector denominado Villonaco en donde se encuentra el equipo receptor, una vez implementado el enlace se realiza pruebas de funcionamiento, se envía tráfico de subida y de bajada con protocolos UDP y TCP para analizar el rendimiento del enlace y carga de CPU.

En el tercer objetivo se realiza una comparación de rendimiento entre el estándar IEEE 802.11ad y 802.11 n/ac a una distancia de 1.8 Km, se habilita el servicio de Internet para hacer un test de velocidad a través de herramienta de cloudflare en donde nos muestra la velocidad máxima alcanzada, la latencia y el jitter hacia Internet utilizando los 2 estándares como son el 802.11ad y el 802.11 n/ac.

En la sección Discusión se efectúa la interpretación de los resultados desde el punto de vista del autor, para finalizar están las Conclusiones a las que se llegaron durante el desarrollo de este trabajo y las Recomendaciones que se dan con respecto a trabajos futuros relacionados

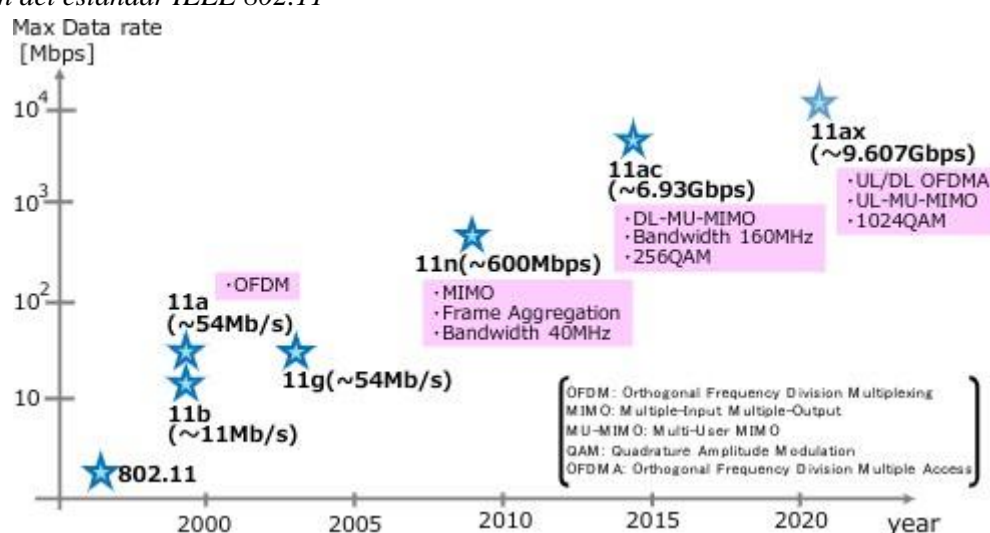
4. Marco teórico

4.1. Evolución del estándar IEEE 802.11.

La primera publicación del estándar 802.11 se dio en el año de 1997 (Banerji & Chowdhury, 2013), especificando una velocidad máxima de 2 Mbps utilizando la banda de frecuencia de 2.4 GHz y ha continuado evolucionando constantemente a través de múltiples revisiones y enmiendas, las nuevas versiones del estándar mejora la capacidad de transmisión y el uso del ancho de banda tanto en las frecuencias de 2.4 GHz, 5GHz y mejorando la seguridad inalámbrica.

Figura 1:

Evolución del estándar IEEE 802.11



Fuente: (Nabetani & Harada, 2022, fig. 1)

4.1.1. IEEE 802.11a y 802.11b

IEEE 802.11a y 802.11b: Las primeras versiones del estándar 802.11 a y 802.11 b fueron publicadas en 1999. El estándar 802.11a ofrece una velocidad de 54 Mbps y dando el soporte en la banda de frecuencia en 5 GHz, el estándar 802.11b ofrece una velocidad de datos de hasta 11 Mbps en la banda de frecuencia de 2.4 GHz. (Sharma & Shah, 2014).

4.1.2. IEEE 802.11g.

IEEE 802.11g: Lanzado en el año 2003, utiliza la banda de frecuencia de 2.4 GHz y permite una velocidad máxima de transmisión de datos de 54 Mbps, mejorando lo del estándar IEEE 802.11b. (Fadilah et al., 2014)

4.1.3. IEEE 802.11n.

IEEE 802.11n: Publicado en el año 2007, mejoró la velocidad de transmisión de datos, tanto en la banda de 2.4 GHz y 5 GHz, obteniendo velocidades de hasta 600 Mbps, con el lanzamiento de este estándar se introdujo la tecnología MIMO que permite la transmisión y recepción simultánea de múltiples señales inalámbricas, el mecanismo de agregación de tramas y la expansión del ancho de banda a 40 MHz.(Selvam & Srikanth, 2009).

4.1.4. IEEE 802.11ac.

IEEE 802.11ac: Lanzado en el 2013, opera en la banda de frecuencia de 5 GHz y alcanza velocidades de transmisión de hasta los 7 Gbps utilizando modulación OFDM y MIMO, introdujo la tecnología MIMO (DL-MU-MIMO) multiusuario de enlace descendente y beamforming, que permite que un punto de acceso (AP) realice una multiplexación espacialmente ortogonal a múltiples estaciones, además de la expansión del ancho de banda a 160 MHz.(Rochim & Sari, 2016).

4.1.5. IEEE 802.11ax.

IEEE 802.11ax: Conocido como WIFI 6, se publicó en el 2019 y es la última versión del estándar, entre las mejores que produjo esta la eficiencia espectral lo que mejora la transmisión de datos y se espera una mejora significativa en el rendimiento del sistema en entornos densos con múltiples dispositivos conectados y alcanzando velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps. (Bellalta, 2016).

4.2. Estándar IEEE 802.11 ad.

Actualmente la fabricación de dispositivos móviles, asistentes, dispositivos de voz, dispositivos IoT tienen la capacidad de conectarse vía inalámbrica, estos equipos vienen con la capacidad de conectarse en la banda de 2.4 GHz y actualmente en 5 GHz, sin embargo debido a la utilización del espectro radioeléctrico por la gran cantidad de equipos existentes, el espectro se satura de manera que el servicio se degrada(Assasa & Widmer, 2016, p. 1).

La banda de frecuencia por encima de los 24 GHz se utiliza para la implementación de enlaces de alta velocidad pero debido a la fácil absorción atmosférica es utilizado para enlaces a corta distancia y dispositivos de corto alcance para la transmisión de grandes velocidades de datos y con una latencia baja, alrededor de 1ms.

El estándar 802.11ad conocido como WiGig, es un estándar de redes inalámbricas de corto alcance que utiliza la banda de 60 GHz para transmitir datos a una velocidad de hasta 7 Gbps. El estándar IEEE 802.11ad utiliza una tecnología de antena de formación de haz para mejorar el rendimiento y es adecuado para aplicaciones de alta velocidad, como la transmisión de vídeo de alta definición y la transferencia de archivos de gran tamaño. (802.11 WG - Wireless LAN Working Group, 2012)

La banda milimétrica, especialmente la de 60 GHz pueden utilizarse para red de área locales pequeñas, donde se requiera una alta tasa de transmisión de datos y debido a las características de la banda de 60 GHz permite el reuso del espectro radioeléctrico, lo que lo hace ventajoso con las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

Debido que el espectro de radio infrautilizado de las ondas milimétricas (mmWave) que van desde 30 GHz a 300 GHz permite satisfacer la demanda de consumo como transmisión de videos, 4K, 8K, juegos en tiempo real, realidad aumentada y realidad virtual. (Sur et al., 2017).

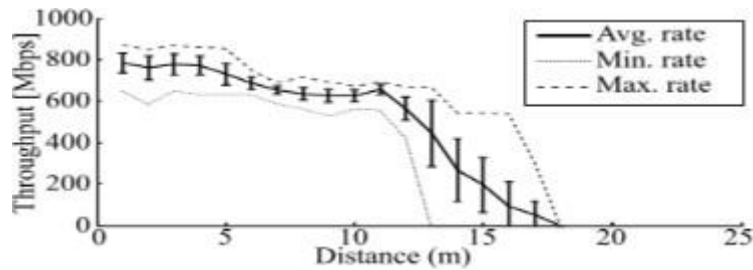
4.3. Capacidad del estándar 802.11ad.

La comunicación inalámbrica en esta banda es muy atractiva, proporciona una capacidad extremadamente alta lo que permite un aumento de varias veces en la transmisión de tasas de datos y latencias más bajas. Sin embargo, la transmisión en esta banda tiene características de propagación de señal específicas en comparación con las tecnologías existentes que funcionan en bandas más bajas y, por lo tanto, requiere cambios de diseño importantes tanto para el control de acceso al medio (MAC) como para capas físicas (PHY).

Tanto Wireless Gigabit Alliance (WiGig) como Wi-Fi Alliance tomaron la iniciativa de aprovechar este amplio espectro y proporcionar comunicaciones de varios gigabits por segundo en la banda sin licencia de 60 GHz. Introdujeron la enmienda WLAN IEEE 802.11ad que proporciona un rendimiento muy alto de hasta 7 Gbps para comunicaciones de corto alcance para redes de área local. Esto permite una gama de nuevas aplicaciones de alta velocidad, como estaciones de acoplamiento inalámbricas, almacenamiento inalámbrico y sincronización instantánea de archivos. IEEE 802.11ad logra un rendimiento de varios gigabits al utilizar solo los canales anchos de 2,16 GHz disponibles en la banda de 60 GHz. (Aggarwal et al., 2021)

Figura 2

Throughput de un enlace de 60 GHz con la relación a la distancia de enlace.



Fuente:(Bielsa et al., 2019, fig. 5)

4.4. Características de las ondas milimétricas.

Las ondas milimétricas son un tipo de onda electromagnética que se encuentran en el espectro de frecuencias entre 30 y 300 GHz. Estas ondas se caracterizan por su alta frecuencia y longitud de onda corta, que permite una mayor capacidad de transmisión de datos en comparación con otras frecuencias más bajas(Assasa & Widmer, 2016, p. 2).

El uso de las ondas milimétricas es una tecnología emergente en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, ya que permite la transmisión de grandes cantidades de datos a través del aire a altas velocidades. Además, debido a su corta longitud de onda, estas ondas son altamente direccionales y pueden ser utilizadas en redes de punto a punto para conexiones de alta velocidad(Nitsche et al., s. f.).

La utilización de las ondas milimétricas para comunicaciones inalámbricas se encuentra en constante evolución, y su uso está siendo explorado en tecnologías como el estándar IEEE 802.11ad, también conocido como WiGig, que utiliza la banda de frecuencia de 60 GHz para la transmisión de datos de alta velocidad.

4.5. Espectro radioeléctrico.

Para el estándar 802.11ad se necesita mínimo de 7 GHz de espectro continuo en el rango de 57-66 GHz para el funcionamiento adecuado del enlace y que la integridad de la información no sufra pérdidas en la descarga y subida de información así como la reproducción de videos. Así mismo un ancho de banda de canal de 2 160 MHz utilizando esquemas de modulación para obtener velocidades de transmisión en Gb/s.(ITU-R, 2015)

Actualmente se encuentran disponibles equipos homologados que operan en la banda de frecuencia de 60 GHz, a continuación se presenta una lista de los mismos.

Tabla 1

Normas ITU del estándar IEEE 802.11ad.

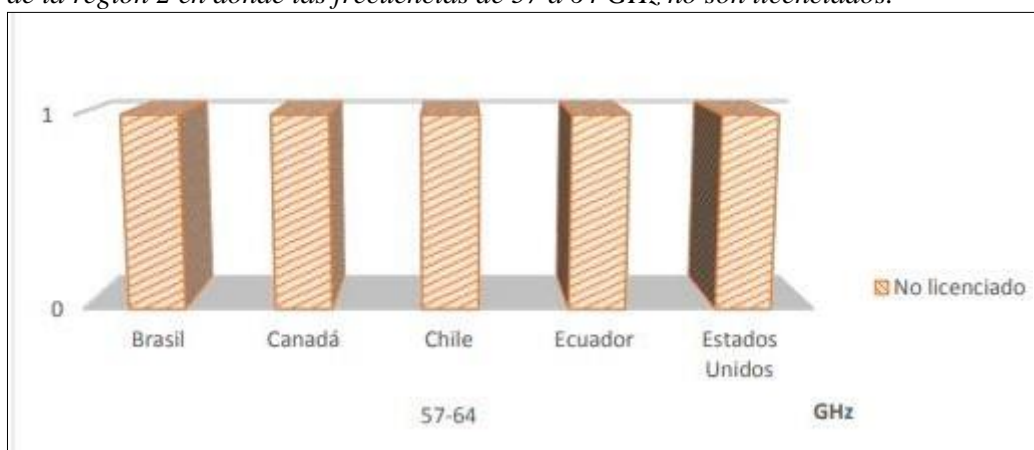
Banda de 60 GHz	Estándar	Norma ITU
57-64	802.11ad	SM.2153-9 (07/2022)
57-64	802.11ad	UIT-R SM.2153-4

Fuente: Esta tabla muestra las clasificaciones del estándar IEEE 802.11 según la norma de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Elaborado por el Autor

Ecuador forma parte de la región 2, establecido por la UIT y forma parte de los estados miembros, el segmento 57-64 GHz es No Licenciado; es decir, no es necesario contar con una licencia, concesión o autorización.

Figura 3

Países de la región 2 en donde las frecuencias de 57 a 64 GHz no son licenciados.



Fuente: (Pere Burkle & Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2017, fig. 5)

Debido a que la tendencia sobre el uso de la banda de 60 GHz se ha incrementado, ha permitido que sea utilizado por el público en general, sin necesidad de obtener una licencia o concesión o permiso a una institución del gobierno para su uso, con el objetivo de alcanzar un nivel adecuado para el despliegue eficaz de redes en la banda de 60 GHz

4.6. Hardware disponible actualmente.

Actualmente existe hardware disponible para realizar enlaces de backbone punto a punto y punto-multipunto para la transmisión de grandes cantidades de datos a través de un enlace de datos estable y con velocidades similares a los enlaces de fibra óptica.

A continuación en la figura 4 se muestra la disponibilidad de tecnología actual referente a la banda de 60 GHz (57 - 66 GHz).

Figura 4

Disponibilidad de tecnología en el mercado actual.



Fuente: (Pere Burkle & Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2017, fig. 1)

A continuación en la figura 5 se muestra la disponibilidad de radios disponibles en tecnología de 60 GHz para enlaces de corta distancia.

Figura 5

Disponibilidad de tecnología en 60 GHz para enlaces de corta alcance.



Fuente: (Pere Burkle & Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2017, fig. 2)

Entre los proveedores de hardware para enlaces de 60 GHz se encuentra la Marca Mikrotik y Ubiquiti con sus productos correspondientes al estándar 802.11ad donde es posible realizar en enlaces con distancias de 500 m, 800m y hasta 1 km, algunos equipos tienen la capacidad de conmutar a la banda de 5 GHz en caso de que el enlace de 60 GHz tenga problemas de enlace debido al entorno donde se implemente.(Mikrotik, 2023) (Ubiquiti, 2022).

4.7. Comparación entre la banda 2.4 GHz, 5 GHz y 60 GHz.

A continuación, se muestra una comparación entre los estándares 802.11 a/b/g/n/ac y el estándar 802.11ad.

Tabla 2

Comparación entre las bandas 2.4, 5 y 60 GHz.

5 GHz (802.11a/n/ac, ax)	60 GHz (802.11 ad)
Espectro Saturado	Absorción de oxígeno
Corto alcance	Distancia corta de alcance
Alto rendimiento	Mayor rendimiento
Más canales disponibles	Espectro libre

Fuente: El autor

Como se aprecia en la tabla 2 la banda de 60 GHz cubre menos distancia esto se debe al aumento de la pérdida de trayecto (la pérdida en 1 m a 60 GHz es de 68 dB frente a los 46 dB a 5 GHz), además la transmisión es direccional, lo que requiere una línea de visión clara entre los dispositivos.

5. Metodología

Para este tipo de investigación se aplicó el método cuantitativo, ya que se analizaron los resultados obtenidos una vez establecidos los enlaces de 60 GHz de acuerdo a la distancia del enlace.

El proceso para desarrollar y terminar el presente TT se detalla en esta sección, en la cual se define el contexto en el que se desarrolló, el proceso para cumplir cada objetivo planteado, los recursos que fueron usados y los participantes.

5.1 Contexto

El presente TT fue desarrollado en la Maestría en Telecomunicaciones dentro de la Facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja; el mismo que está enfocado en analizar los enlaces de 60 GHz, con la finalidad de cumplir el objetivo principal que fue planteado, el mismo que es: Evaluar el desempeño del estándar 802.11ad (60 GHz) para enlaces de backbone para distancias cortas en ambientes con LOS (línea de vista).

5.2 Proceso

Para llevar a cabo el objetivo general del presente TT se realizará el siguiente proceso.

Fase 1: Realizar un estudio del estándar 802.11ad (60 GHz) para conocer el hardware disponible actualmente.

- Se recopiló información bibliográfica sobre proyectos relacionados
- Se obtuvieron las comparaciones de equipos de 60GHz, dividido entre fabricantes y equipos con los respectivos modelos, el cual se puede visualizar en la sección 6.1 de los Resultados.

Fase 2: Analizar el rendimiento de equipos con tecnología 802.11ad como enlaces de backbone para la transmisión de grandes cantidades de datos en entornos abiertos.

- Se realizó la instalación y configuración de los equipos transmisor y receptor con tecnología 802.11ad en la parroquia Carigan del cantón Loja.

- Se calculó la distancia entre transmisor y receptor para determinar la factibilidad de línea de vista.
- Se ejecutaron pruebas de conectividad.
- Se ejecutaron pruebas de latencia.
- Se ejecutaron pruebas de envío y recepción de paquetes de datos.
- Se obtuvieron evidencias fotográficas de la instalación de los equipos transmisor y receptor, las configuraciones de estos equipos y los resultados de las pruebas anteriormente detalladas, las mismas que se pueden revisar en la sección 6.2 de los Resultados.

Fase 3: Examinar el throughput que manejan los equipos en 60 GHz y su diferencia con el estándar WIFI 5 para determinar ventajas y desventajas de ambos estándares

- Se inspeccionó el throughput que manejan los equipos en 60 GHz y los equipos del estándar WIFI 5.
- Se analizaron y redactaron diferencias entre los equipos de 60 GHz y los equipos WIFI 5.
- Se establecieron las ventajas y desventajas de los equipos de 60 GHz y los equipos WIFI 5.
- Se redactaron los ítems antes mencionados, el mismo que se puede revisar en la sección 6.3 de los Resultados

5.3 Recursos

5.3.1 Recursos Técnicos

Para elaborar el presente TT se utilizó el método cuantitativo debido a que se analizaron y procesaron datos numéricos para estudiar los enlaces.

5.3.1.1 Revisión Bibliográfica

Permitió investigar y definir conceptos importantes para el desarrollo del presente TT e identificar trabajos relacionados, que ayudaron a detallar la metodología y las herramientas a utilizar.

6. Resultados.

En esta sección se muestra el cumplimiento de los objetivos planteados en este Trabajo de Titulación.

6.1. Objetivo 1: Realizar un estudio del estándar 802.11ad (60 GHz) para conocer el hardware disponible actualmente.

Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron las consultas bibliográficas correspondientes a la temática obteniendo que actualmente en el mercado existen varios fabricantes de antenas que ofrecen equipamiento en 60 GHz para enlaces de backhaul en frecuencias libres, no licenciadas

En Ecuador se está utilizando equipos de 60 GHz de diferentes marcas para enlaces a corta distancia para transmitir grandes cantidades de información, sin embargo entre las más adquiridas y accesibles al mercado nacional se encuentran los fabricantes Mikrotik, Ubiquiti y Mimoso y los respectivos fabricantes de chips que funcionan en la banda de 60 GHz.

Chips con el estándar 802.11ad.

Tras la fusión de WI-FI Alliance y WiGig Alliance, se están desarrollando nuevos estándares compatibles entre sí que funcionen también sobre la banda de los 60 GHz, el fabricante Wilocity era parte de WiGi Alliance y la cual desarrollaba chips inalámbricos multigigabit de 60 GHz tanto para la plataforma informática móvil como para los mercados periféricos

Wilocity inició la creación del grupo de trabajo IEEE 802.11ad con el principal objetivo de mejorar el estándar WLAN inalámbrico, como el estándar 802.11n y el 802.11 ac (conocido como WIFI 5) e incrementar velocidades de transmisión inalámbrica que lleguen alcanzar hasta las 7 Gbps

Chips Qualcomm

En el 2014 el fabricante de chips Qualcomm adquiere a Wilocity con el objetivo de desarrollar chip más avanzados y que alcancen velocidades de hasta 10 Gbps, entre los fabricantes de hardware que utilizan los chips inalámbricos se encuentran Mikrotik y Ubiquiti.

Entre los modelos de chips inalámbricos se encuentran el modelo QCA6335 y QCA6438, a continuación, se realiza una tabla comparativa de estos 2 modelos de chips.

Tabla 3

Chipset inalámbricos 60 GHz ad

Características	QCA6335	QCA6438
Estándar IEEE 802.11 ad	Si	Si
Banda no licenciada	Si	Si
Tasa de transmisión	4.6 Gbps	10 Gbps
Estándar IEEE 802.11 ay	No	Si

Fuente: El autor

Fabricante de antenas para enlaces de backbone en 60 GHz.

Entre los fabricantes de equipos conocidos en el país y más utilizados por su accesibilidad en cuanto a lo económico, se encuentran los fabricantes como Mikrotik y Ubiquiti.

Equipamiento Mikrotik 60 GHz.



Mikrotik ofrece una serie de modelos de antenas que funcionan en el estándar 802.11ad y que permiten realizar enlaces de backbone capaces de transmitir hasta 700 a 800 Mbps cuando se encuentran en producción y en entornos abiertos a una distancia máxima 1.5 Km y una modulación máxima de 8 MCS.

Modelos de equipos.

De acuerdo a las especificaciones del fabricante existen 2 modelos de equipos que pueden funcionar para enlaces de backbone para transmitir grandes cantidades de datos, los modelos son los siguientes.

- LHG 60 GHz.
- Cube 60 Pro ac

Tabla 4*Comparativa de modelos del fabricante Mikrotik.*

Características	LHG 60 GHz	Cube 60 Pro ac
Banda de funcionamiento	60 GHz	60 GHz y 5 GHz (La banda de 5 GHz se utiliza para backup)
Estándar	IEEE 802.11ad	802.11ad, ay, a/n/ac
Distancia de enlace	1.5 Km	2 Km
Chip inalámbrico	Qualcomm QCA6335	Qualcomm QCA6438
Data rate	2 Gbps	4 Gbps
Consumo máximo de energía	5 W	13 W
Imagen referencial		

Fuente: El autor



Los equipos del fabricante Mikrotik a nivel de precio no son elevados a comparación con otros fabricantes, el precio sugerido por el fabricante son de \$ 149,00 y la banda de 60 GHz no son licenciadas, los dos modelos trabajan en las frecuencias: 58320, 60480, 62640, 64800, 66000, 66960.

Equipamiento Ubiquiti en 60 GHz

A diferencia de Mikrotik, el equipamiento en Ubiquiti para enlaces de backbone en 60 GHz son el doble de costosos, pero su rango de cobertura es mucha más amplia, por el rango de los 12 Km y su consumo de energía es elevado por arriba de los 18 W, los modelos más conocidos por el fabricante son los siguientes.

- UISP airFiber 60 LR
- UISP airFiber 60 XR

Tabla 5*Comparativa de modelos del fabricante Ubiquiti.*

Características	UISP airFiber 60 LR	UISP airFiber 60 XR
Banda de funcionamiento	60 GHz	60 GHz y 5 GHz (La banda de 5 GHz se utiliza para backup)
Estándar	IEEE 802.11ad	802.11ad, a/n/ac
Distancia de enlace	12 Km	15 Km
Data rate	1.95 Gbps	2.5 Gbps
Consumo máximo de energía	18W	24W
Imagen referencial		

Fuente: El autor

Los equipos del fabricante Ubiquiti a nivel de precio son elevados, por ejemplo, el modelo UISP airFiber 60 LR (El Data Sheet del equipo Ubiquiti se encuentra en el anexo 1: Data Sheet airFiber 60 LR) está \$400,00 y el modelo UISP airFiber 60 XR está alrededor de los \$1000,00. Las bandas no son licenciadas, los dos modelos trabajan en las frecuencias: 57 a 71 GHz.

6.2. Objetivo 2: Analizar el rendimiento de equipos con tecnología 802.11ad como enlaces de backbone para la transmisión de grandes cantidades de datos en entornos abiertos.

6.2.1. Análisis matemático para el presupuesto de Enlace.

Cálculo de pérdida del espacio libre y atenuación por lluvia en la banda de 60 GHz

Se realizan cálculos matemáticos del radioenlace de 60 GHz para el envío y transmisión de datos, con el resultado de los datos obtenidos se verificará factibilidad y disponibilidad del enlace.

A continuación, se detalla los datos específicos del radio enlace como coordenadas geográficas, ganancia de antena, frecuencia en la que trabaja el radio enlace, así mismo la distancia del radioenlace es de 1839.34 m

Tabla 6
Equipo Transmisor.

Latitud	-3.959513
Longitud	-79.256691
Altura	2392.100098 m
Ubicación	Loja (Lolita Samaniego)
Frecuencia	60 GHz (60000 MHz)
Ganancia de antena	40 dBi

Fuente: El autor

Tabla 7
Equipo Receptor.

Latitud	-3.948883
Longitud	-79.269056
Altura	2600 m
Ubicación	Loja (Cerro Villonaco)
Frecuencia	60 GHz (60000 MHz)
Ganancia de antena	40 dBi

Fuente: El autor

Pérdida del espacio libre

La pérdida del espacio libre se producen al propagarse la onda por el vacío y en línea recta sin tomar en cuenta la absorción ni reflexión de energía en objetos cercanos, este parámetro es calculado para predecir la pérdida de la onda electromagnética al propagarse en línea recta en una trayectoria por el espacio libre.

$$L_{fs}(dB) = 32.45 + 20 \log f(\text{MHz}) + 20 \log d(Km)$$

$$L_{fs}(dB) = 92.45 + 20 \log f(GHz) + 20 \log d(Km)$$

En donde:

- d es la distancia en kilómetros
- f es la frecuencia de operación en MHz o GHz
- $L_{fs}(dB)$ = Pérdida del espacio libre.

En enlace funciona en la frecuencia de 60 GHz y una distancia entre el transmisor y receptor de 1839.34 m o 1.83934 Km

$$L_{fs}(dB) = 92.45 + 20 \log 60 (GHz) + 20 \log 1.83934 (Km)$$

$$L_{fs}(dB) = 92.45 + 20 * 1.81954 (GHz) + 20 * 0.26466 (Km)$$

$$L_{fs}(dB) = 92.45 + 35.5630 + 5.2932$$

$$L_{fs}(dB) = 133.3062 dBm$$

De acuerdo al datasheet del equipo utilizado para esta prueba, tiene un alcance de hasta 2 Km, se realiza el cálculo de pérdida del espacio libre

Tabla 8
Cálculos de pérdida de espacio libre según la distancia

Distancia (Km)	Pérdida del espacio libre
1.83934	$L_{fs}(dB) = 133,3062 dBm$
2	$L_{fs}(dB) = 134,0335 dBm$
1.36	$L_{fs}(dB) = 130,683 dBm$
0.5	$L_{fs}(dB) = 121,9925 dBm$
0.005	$L_{fs}(dB) = 81,9925 dBm$

Fuente: El autor

Presupuesto de enlace

Potencia de recepción.

Para el cálculo de la potencia de recepción se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{fs}$$

De acuerdo a la ficha técnica del equipo en 60 GHz utilizado para las pruebas, la frecuencia y la potencia máxima transmitida se enumeran a continuación:

- 57 - 66 GHz:
- Potencia máxima transmitida 34,02 dBm
- Ganancia de antena: 42 dBi

Se procede a realizar los cálculos de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{fs}$$

En donde:

- P_{rx} Potencia de recepción
- P_{tx} Potencia de Transmisión
- G_{tx} Ganancia de la antena
- L_{fs} Pérdida de espacio libre

En este caso se tiene los siguientes valores para:

$$P_{tx} = 34.02 \text{ dBm}$$

$$G_{tx} = 42 \text{ dBi}$$

$$L_{fs} = 133,3062 \text{ dBm para la distancia de 1.83934 Km}$$

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 34.02 + 42 - 130.683$$

$$P_{rx} = -57,29 \text{ dB}$$

Se realiza el cálculo para una distancia 1.36 Km

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{fs}$$

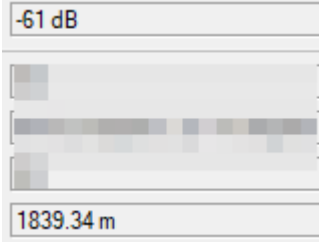
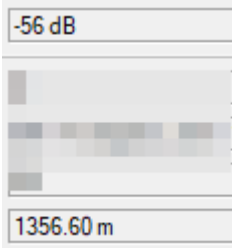
$$P_{rx} = 34.02 + 42 - 130.683$$

$$P_{rx} = -54,663 \text{ dB}$$

Comparación de los cálculos teóricos con el resultado del radioenlace de 60 GHz a través del software disponible en el equipamiento.

Tabla 9

Cálculos

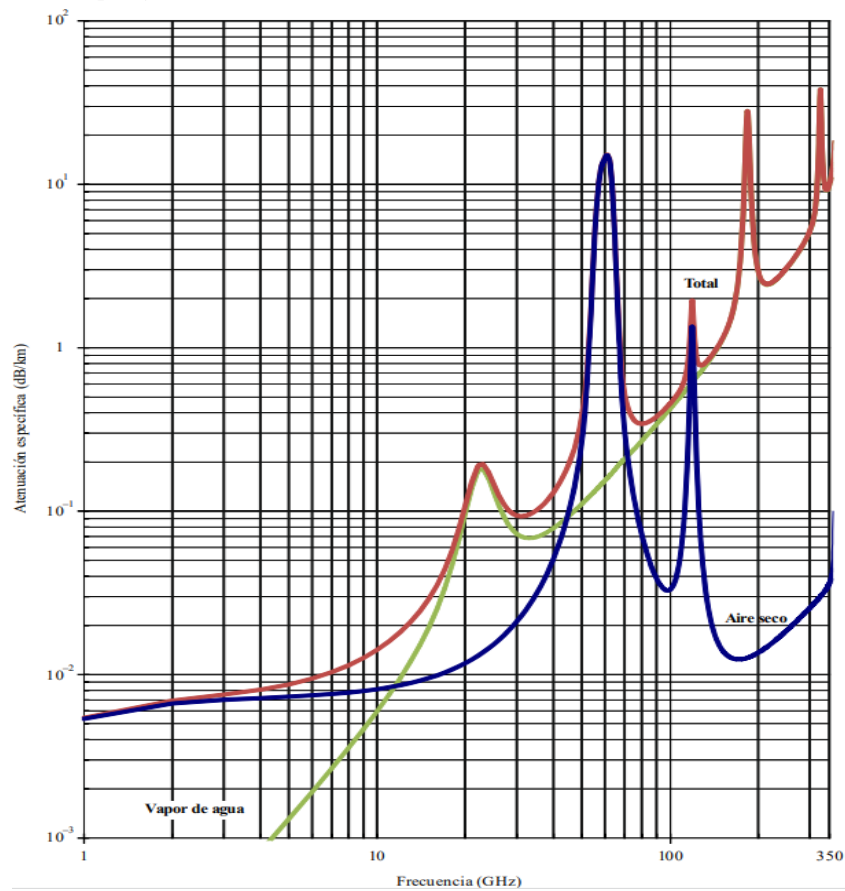
	Cálculos teóricos	Resultado de radio enlace a 60 Ghz obtenidos a través de sistema operativo instalado en los equipos
Potencia de recepción (Prx) a 1.8 Km	-57,29 dB	-61 dB 
Potencia de recepción (Prx) a 1.36 Km	-54,663 dB	-56 dB 

Fuente: El autor

Atenuación atmosférica e hidrometeoros

La absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros son las principales causas de la atenuación atmosférica.

Figura 6
Gráfico de atenuación por factores ambientales



Fuente: (ITU-R, 2017, fig. 5)

La atenuación se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua, efecto despreciable a frecuencias inferiores a 10 GHz

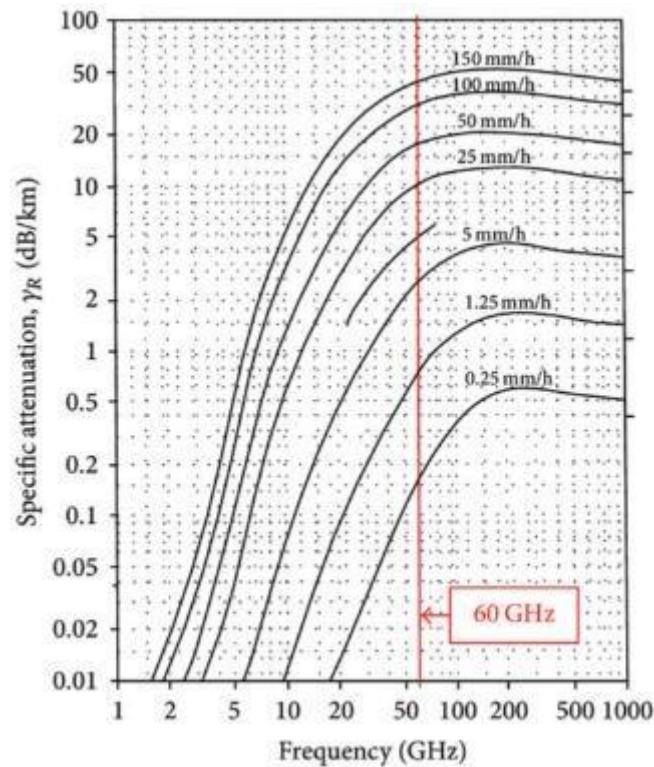
Para una atmósfera normal picos de absorción a 22.3 GHz (vapor de agua) y a 60 GHz (oxígeno).

- Atenuación a (22.3 GHz) próxima a 1.5 dB/km
- Atenuación a (60 GHz) próxima a 15 dB/km

La recomendación UIT-R P.676 proporciona la metodología para el cálculo de valores. Gráfico de atenuación específica de lluvia de acuerdo a la recomendación UIT-R P.838

Figura 7

Atenuación específica por lluvia, en este caso la tasa de lluvia calculada en mm/h (milímetros por hora) y sus correspondientes factores de atenuación (unidad: dB/Km, es decir, decibel por kilómetro) a 60 GHz



Fuente: (Kim et al., 2017, fig. 5)

Para el cálculo de la atenuación específica se considera la siguiente fórmula.

$$\gamma_a = k * R^a$$

En donde k y a Son valores constantes que se encuentran en la tabla anexa de la recomendación UIT-R P.838-3 (Se encuentra en el anexo 2: Recomendación UIT-R P.838-3, Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción). y que están de acuerdo a la frecuencia establecida del radio enlace, en este caso 60 GHz

El parámetro R Es la intensidad de la lluvia anual, en este caso se obtiene el promedio anual de lluvia en el cantón Loja de 46.32 mm/h y los valores de k y a

$$k = 0,707$$

$$a = 0,826$$

$$\gamma_a = k * R^a$$

$$\gamma_a = 0,707 * 46,32^{0,826}$$
$$\gamma_a = 16.80 \text{ dB/Km (Atenuación específica por lluvia)}$$

Atenuación total debido a la lluvia.

La distancia del radioenlace en 60 GHz es de 1.8 Km, dado este valor se calcula el valor de atenuación con respecto a la lluvia

$$A = \gamma_a L_{ef}$$
$$A = 16.80 \text{ dB/Km} * 1.8 \text{ Km}$$
$$A = \mathbf{30.24 \text{ dB}}$$

Para el cumplimiento del segundo objetivo se ha considerado el uso del equipamiento del fabricante Mikrotik (Se puede revisar las especificaciones técnicas del equipo en el Anexo 3: Data Sheet Mikrotik), el modelo LHG 60 GHz para realizar un enlace de backbone a corta distancia con el objetivo de transmitir grandes cantidades de información a baja latencia.

Para obtener estos resultados se ha elegido un punto estratégico en el cantón Loja para brindar el servicio de Internet a parroquias rurales como Chantaco, Taquil, Chuquiribamba.

La red de acceso para brindar el servicio de Internet a los usuarios de estas parroquias será por radio enlace en la banda de 5 GHz, los puntos de acceso están ubicados en el cerro denominado Villonaco, cuyas coordenadas son las siguientes: -3.949127, -79.269516, en este cerro está ubicado una torre de telecomunicaciones y su funcionamiento es a través de paneles solares y baterías adecuadas para que los equipos estén operativos las 24 horas.

Figura 8
Torre de telecomunicaciones ubicado en el cerro Villonaco



Fuente: El autor

Figura 9
Banco de paneles solares para mantener operativo el equipamiento de backbone y la red de acceso



Fuente: El autor

El enlace de backbone hacia el cerro Villonaco se realiza desde el sector Lolita Samaniego de la parroquia Carigan, donde existe una Torre de telecomunicaciones y cuyo enlace principal es a través de fibra óptica.

Figura 10

Ubicación de la torre de telecomunicaciones en el sector llamado Lolita Samaniego



Fuente: El autor

En la torre de telecomunicaciones ubicado en el sector de Lolita Samaniego se instala el equipo transmisor de la marca Mikrotik que funciona en la banda de 60 GHz en el estándar 802.11ad, debido a que el cerro Villonaco se encuentra aislado de las parroquias urbanas de Loja es imposible llegar con fibra óptica y debido a su elevado costo de implementación, es por ello que se implementa el enlace en 60 GHz ya que una de sus ventajas es su costo asequible.

A través de la herramienta de google maps, se calcula la distancia del enlace para saber si existe factibilidad desde Lolita Samaniego hasta el cerro Villonaco ya que según las especificaciones del modelo del equipo la distancia máxima para enlaces punto a punto en 60 GHz es desde 800 metros hasta los 2 Km como máximo.

Figura 11

Línea de vista (LOS) desde Lolita Samaniego hasta el cerro Villonaco

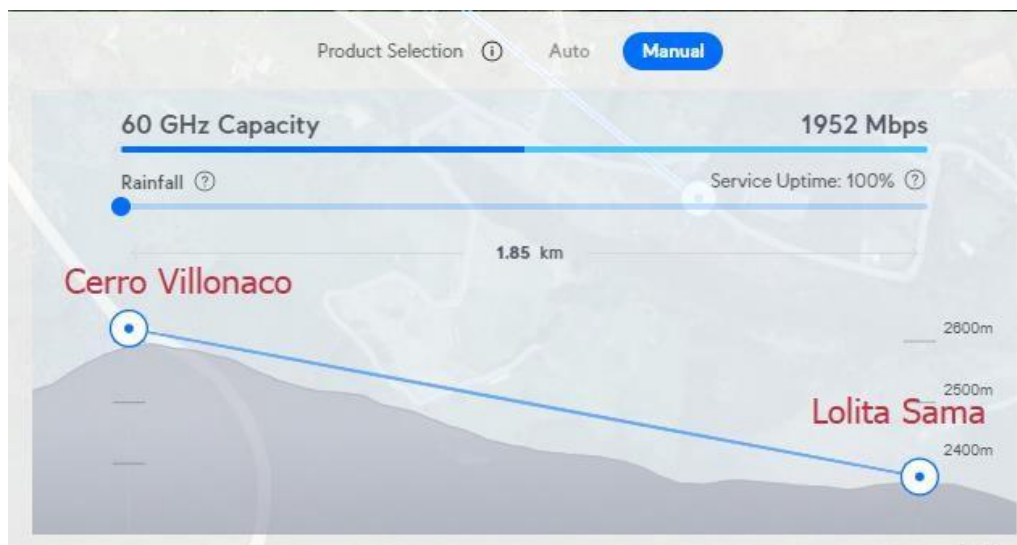


Fuente: El autor

A través de la herramienta de diseño de redes de la plataforma Ubiquiti se calcula la distancia que existe entre los dos puntos, capacidad del enlace en 60 GHz y Línea de vista sin obstrucciones, lo que nos da como resultado la factibilidad para implementar el enlace en 60 GHz.

Figura 12

Capacidad de enlace y distancia calculada en 1.85 Km



Fuente: El autor

Se procede a la instalación y configuración de las antenas con el estándar IEEE 802.11ad, desde el lugar de transmisión hasta el cerro Villonaco.

Figura 13

Instalación del equipo 60 GHz en el cerro Villonaco



Fuente: El autor

Figura 14

Equipo TX con el estándar 802.11ad



Fuente: El autor

Figura 15

Perspectiva desde el sector Lolita Samaniego hasta el cerro Villonaco



Fuente: El autor

Configuración de equipos.

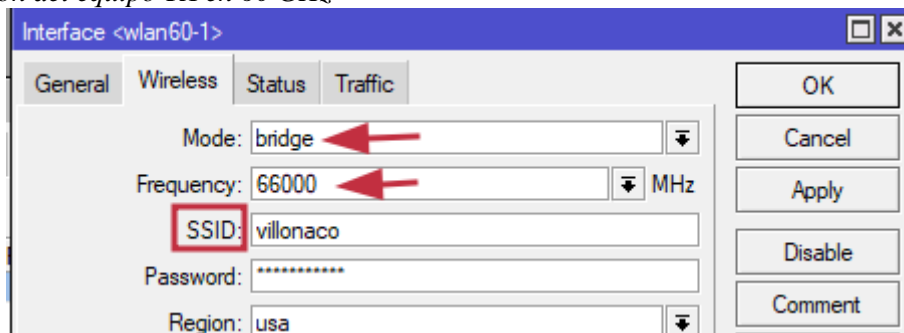
El fabricante Mikrotik instala en sus equipos su propio sistema operativo denominado RouterOS, este sistema operativo posee una gran versatilidad y una interfaz amigable para su configuración y programación.

El acceso a los equipos puede ser a través de ssh, por línea de comandos o por el software de gestión proporcionado por el propio fabricante llamado WinBox

Se configura el equipo transmisor con un SSID como identificativo, se establece la banda a utilizar, así mismo se establece una contraseña para que el enlace de conexión sea seguro.

La configuración se da en modo Bridge de acuerdo al manual de configuración, se establece la frecuencia en 66000 y se establece el SSID y una contraseña de enlace para seguridad.

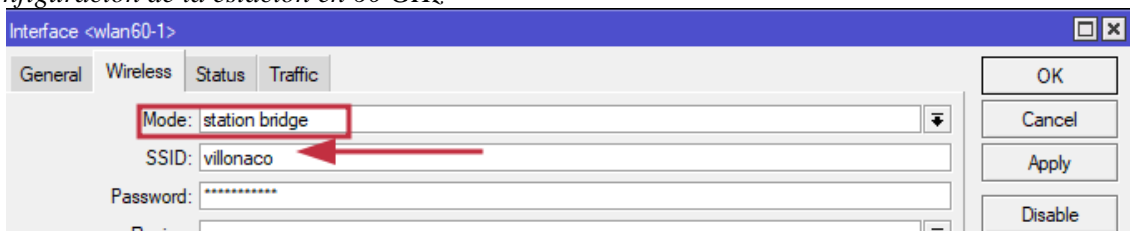
Figura 16
Configuración del equipo TX en 60 GHz



Fuente: El autor

A continuación se procede a configurar la estación, se selecciona el modo de configuración, en este caso en “station bridge” y se establece el SSID y la contraseña de seguridad establecido en el equipo transmisor

Figura 17
Configuración de la estación en 60 GHz



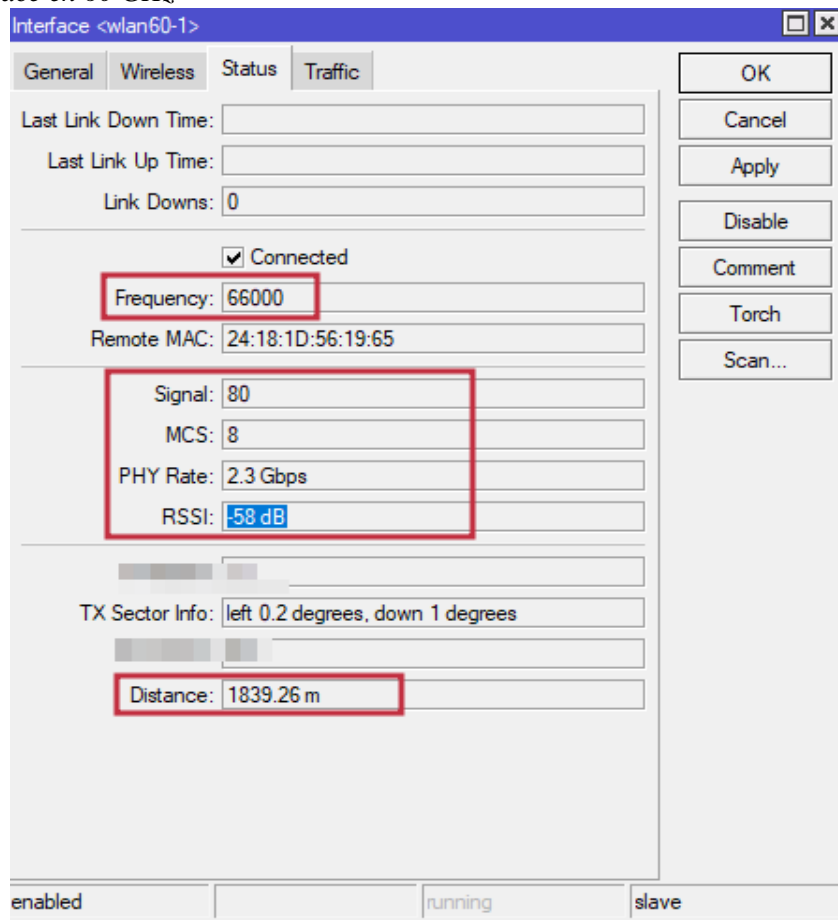
Fuente: El autor

Una vez establecido el enlace se verifica el estatus que proporcionan los equipos, en la cual se puede verificar la calidad de la señal, la distancia del enlace en Km, la modulación que alcanza y la capacidad de la capa física.

En la imagen Nro 11, se puede observar las siguientes características una vez establecido el enlace entre ambos equipos con el estándar IEEE 802.11ad

- Frecuencia: 66000
- Signal: 80
- MCS: 8. La modulación máxima que alcanza es de 8, por lo tanto la capacidad máxima de la capa física será de 2.3 Gbps.
- RSSI: -58 dB. De acuerdo a la escala entre -40 a -80, -58 dB se encuentra en el rango de una señal idónea, siendo -40 excelente y -80 una señal débil.
- Distancia de enlace: 1839.26 m

Figura 18
Estatus del enlace en 60 GHz



Fuente: El autor

Pruebas de enlace.

A continuación se realizan pruebas de enlace una vez establecidas las configuraciones de las antenas. De acuerdo al datasheet del fabricante los equipos están contruidos con el chip Wireless Qualcomm QCA6335, tienen una interfaz RJ45 con capacidad de negociación de 1 Gb, además del estándar IEEE 802.11ad, incluye también el estándar PoE de entrada 802.3af/at con un voltaje de entrada de 12V a 57V y un bajo consumo de energía de 5W lo que funciona adecuadamente con energía solar.

De acuerdo a la pruebas de laboratorio de velocidad de transmisión máximas alcanzadas entre los equipos muestra lo siguiente.

Tabla 10

Resultados pruebas de laboratorio de velocidad de transmisión

Mode	Configuración	Tamaño del paquete		
		1518 byte	512 byte	64 byte
Puente	Solo la opción de wireless, sin firewall, sin tablas de enrutamiento	998.2 Mbps	999.0 Mbps	760.2 Mbps
Routing	Solo la opción de wireless, sin firewall, sin tablas de enrutamiento	998.2 Mbps	999.0 Mbps	761.9 Mbps

Fuente: El autor

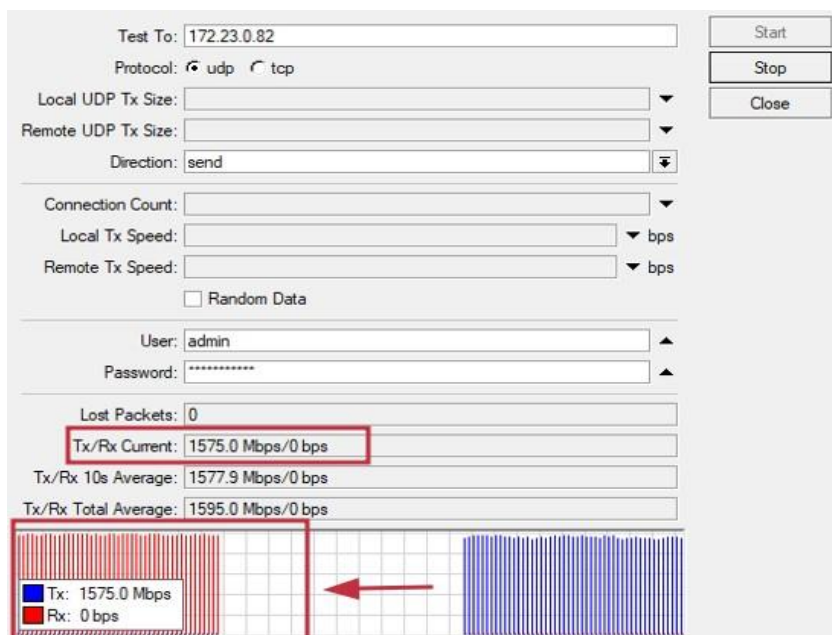
Para la evaluación del rendimiento de este enlace se tomará en cuenta el factor ambiental y la distancia de dicho enlace, se tiene como objetivo evaluar la eficiencia del enlace de 60 GHz en un entorno real a fin de brindar un servicio de Internet con alta capacidad de transmisión, donde no existe interferencia por saturación de frecuencia en la banda de 5 GHz

A continuación se detalla el resultado de las pruebas obtenidas.

Velocidad de descarga.

Figura 19

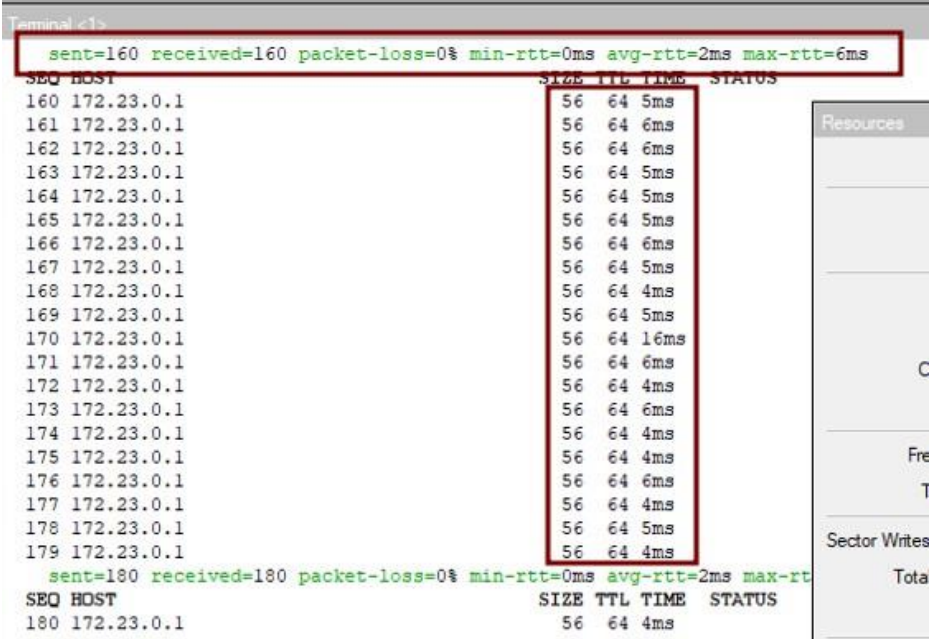
Velocidad de descarga



Fuente: El autor

Se puede apreciar la velocidad de descarga con el protocolo UDP y el tamaño de paquete por defecto, se aprecia que la máxima capacidad de transmisión del equipo en un promedio de 10 segundos es de 1577.9 Mbps y el promedio total es de 1595.0 Mbps.

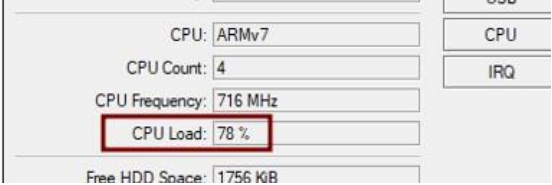
Figura 20
Latencia de enlace hacia el equipo core.



Fuente: El autor

Se aprecia que la latencia cuando el equipo está al 100 % de su capacidad es de promedio 2 ms, con un máximo de 6 ms lo que muestra la eficiencia del enlace inalámbrico en 60 GHz con tráfico UDP, así mismo se aprecia el procesamiento del equipo que se encuentra en un 78 % con margen aceptable para el funcionamiento del equipo.

Figura 21
Carga de CPU de equipo TX



Fuente: El autor

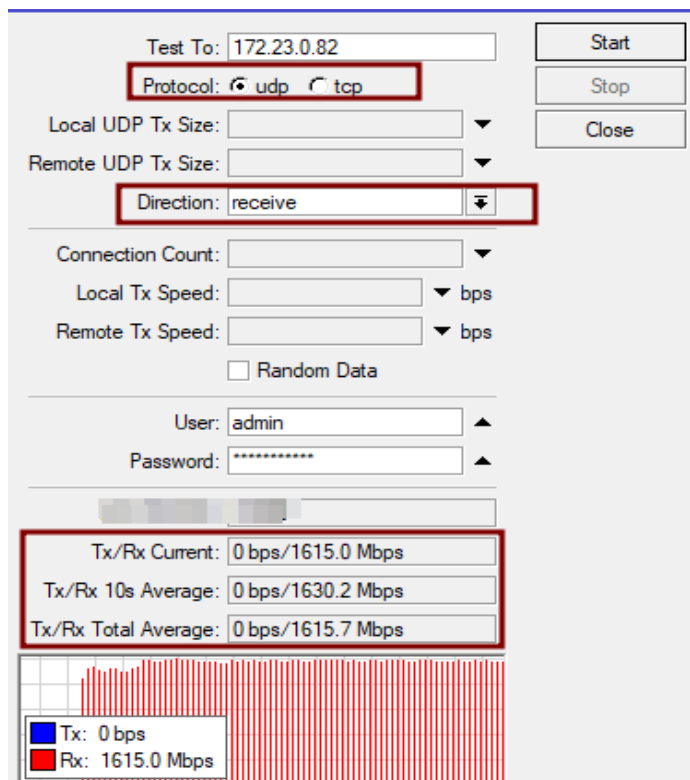
Figura 22
Carga de CPU de equipo RX



Velocidad de upload.

Se realiza las pruebas de velocidad de transmisión de subida con el enlace de 60 GHz, con su capacidad máxima, tamaño de paquete por defecto y con la distancia de enlace de 1.8 km.

Figura 23
Velocidad de subida



Fuente: El autor

Se observa que la velocidad de transmisión de subida en un promedio de 10s es de 1630.2 Mbps, dando un promedio de 1615.7 Mbps, la latencia es igualmente a 1 ms, máximo 6 ms y la carga de CPU de un 17% en el equipo receptor.

Figura 24
Latencia de subida

```
sent=20 received=20 packet-loss=0% min-rtt=0ms avg-rtt=1ms max-rtt=6ms
SEQ HOST          SIZE TTL TIME STATUS
20 172.23.0.1      56  64 5ms
21 172.23.0.1      56  64 6ms
22 172.23.0.1      56  64 5ms
23 172.23.0.1      56  64 4ms
24 172.23.0.1      56  64 4ms
25 172.23.0.1      56  64 4ms
26 172.23.0.1      56  64 4ms
```

Fuente: El autor

Figura 25
Carga de CPU.

CPU:	ARMv7	CPU
CPU Count:	4	IRQ
CPU Frequency:	716 MHz	
CPU Load:	17 %	

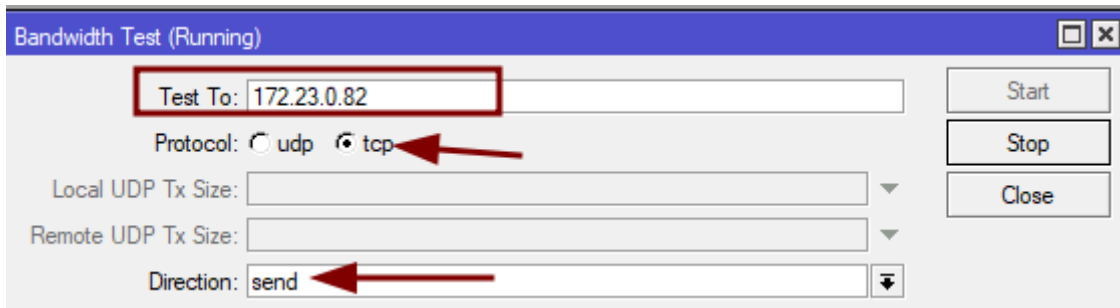
Fuente: El autor

Velocidad de descarga y subida con el Protocolo TCP.

El protocolo TCP se emplea para crear conexiones entre sí, de forma que se pueda garantizar el flujo de datos entre las partes, debido a que TCP sirve a una gran cantidad de protocolos de la capa de aplicación es fundamental que los datos lleguen correctamente al destinatario, sin errores, y en orden

Se realiza la prueba de descarga con el protocolo TCP entre el equipo transmisor y receptor en la cual se verifica su capacidad máxima de throughput y carga de CPU de ambos equipos.

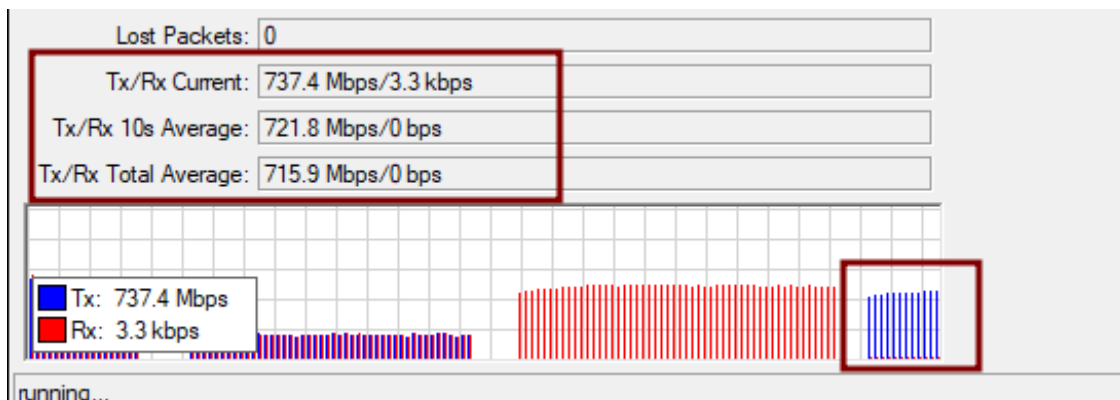
Figura 26
Test de velocidad de bajada con el protocolo TCP.



Fuente: El autor

Se verifica que la capacidad máxima de bajada con el protocolo TCP es de alrededor 700 Mbps, 50% menos que la capacidad de bajada con el protocolo UDP.

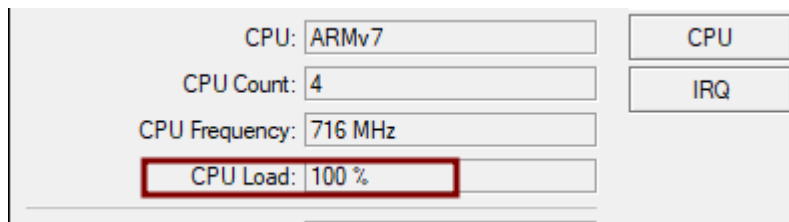
Figura 27
Velocidad de bajada promedio de 715.9 Mbps



Fuente: El autor

La carga de CPU con el protocolo de TCP es del 100 %, por lo que no existe un margen de capacidad de procesamiento, por lo que no es recomendable que el enlace se encuentre a su capacidad máxima ya que el equipo se inhibiría y dejará de funcionar.

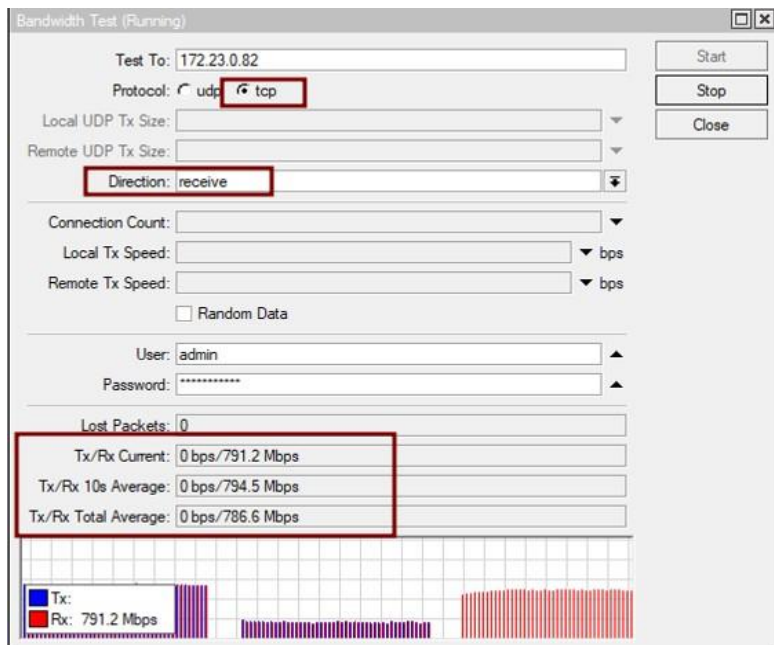
Figura 28
Carga de CPU con velocidad de descarga



Fuente: El autor

Así mismo se realiza el test de velocidad de subida con el protocolo TCP en donde se muestra los siguientes resultados.

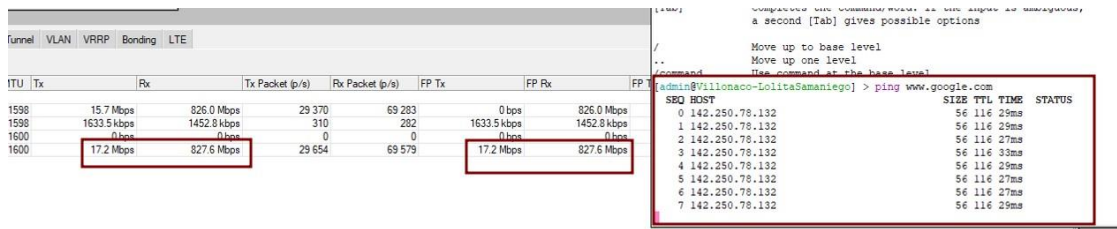
Figura 29
Resultados, velocidad de subida



Fuente: El autor

La velocidad promedio en tiempo de 10s es de 794.5 Mbps, alrededor del 50 % menos que con el protocolo UDP, y dando un promedio de 786.6 Mbps de capacidad de subida del enlace. La latencia tanto con el protocolo UDP y TCP hacia Internet por ejemplo a google es de promedio 28ms, con el enlace trabajando a 100% de su capacidad.

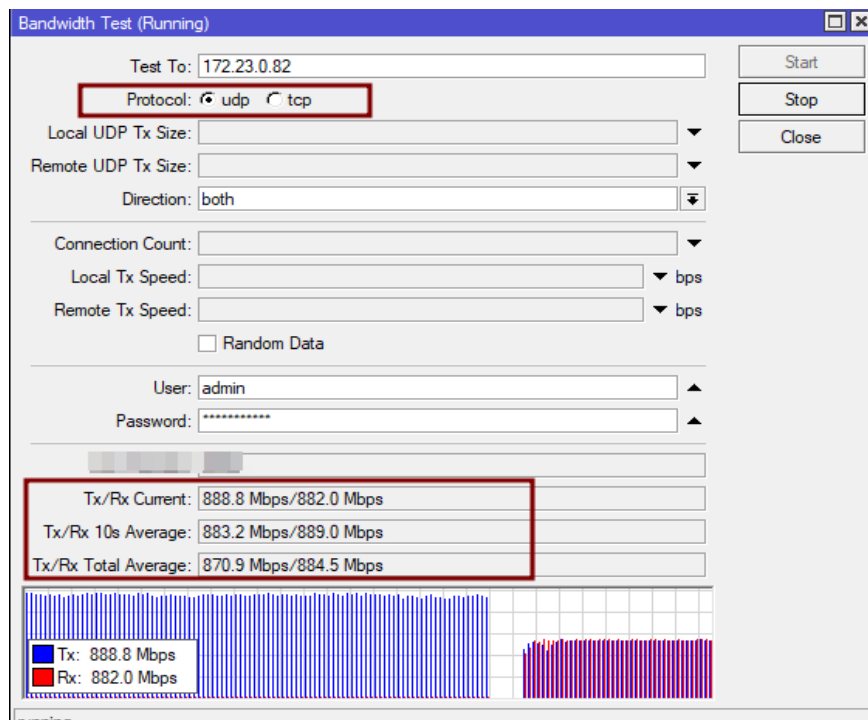
Figura 30
Tiempo de latencia hacia Internet.



Fuente: El autor

Si se desea que el enlace de 60 GHz brinde un servicio de Internet simétrico se dividirá la capacidad del enlace para 2, en este caso por ejemplo, con el protocolo UDP que en el test de velocidad de descarga o de subida es de alrededor de 1600 Mbps, estos se dividirá en 800 Mbps tanto para la bajada como la subida funcionando al mismo tiempo.

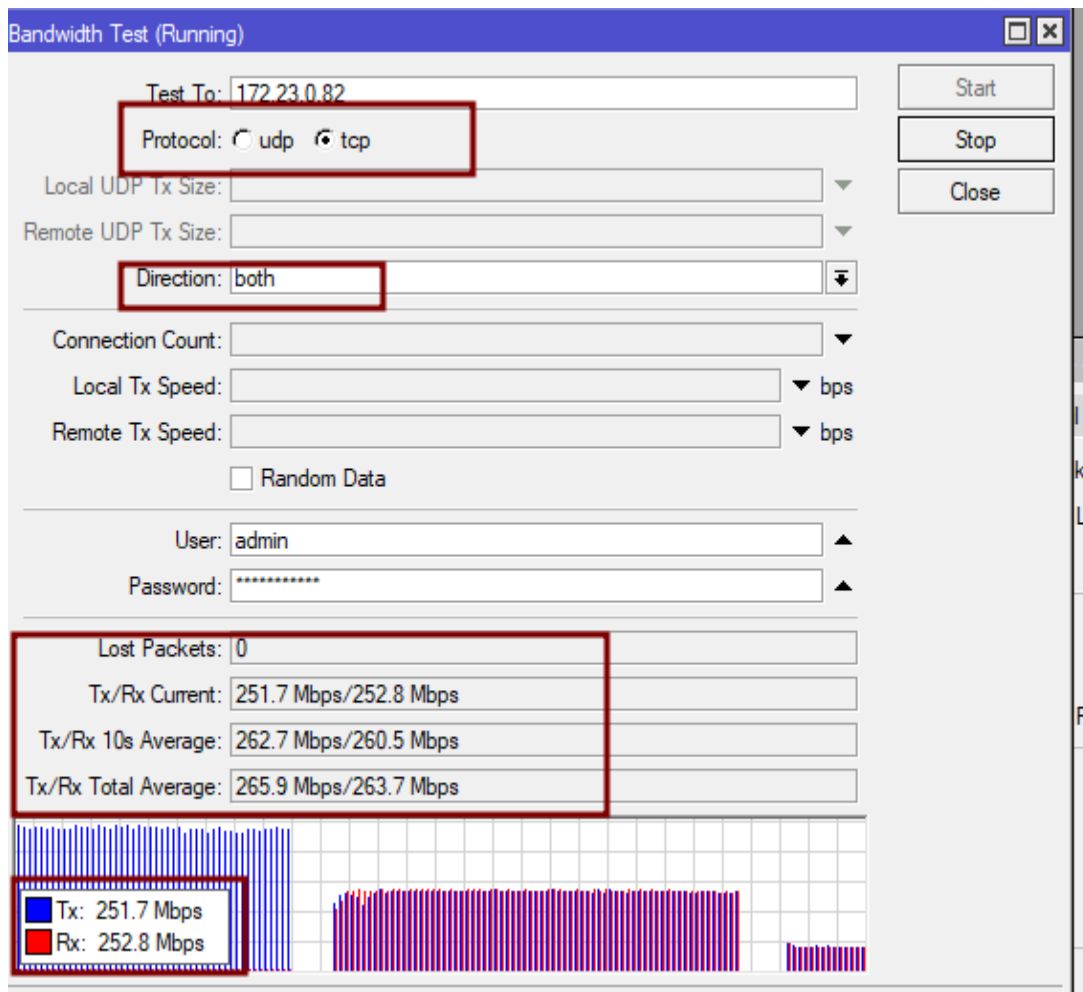
Figura 31
Velocidades simétricas (descarga y subida) con el protocolo UDP.



Fuente: El autor

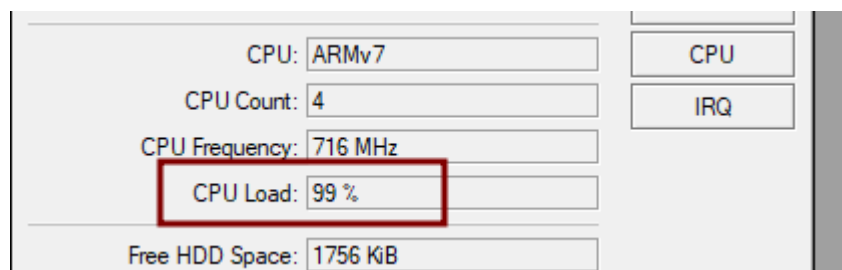
Para el protocolo TCP con velocidades simétricas es alrededor de 300 Mbps, sin embargo la carga de CPU se eleva al 100 % por lo no existe un margen de funcionamiento, ya que el equipo se apagaría por sobrecarga.

Figura 32
Velocidad simétrica con el protocolo TCP.



Fuente: El autor

Figura 33
Carga de CPU con velocidades simétricas con el protocolo TCP.



Fuente: El autor

El enlace de 60 GHz brindara el servicio de Internet alrededor de 70 personas, con buena capacidad de throughput para subida y descarga de datos, así mismo se aprecia la eficiencia de la banda de 60 GHz, cuya onda es milimétrica para un brindar un servicio eficiente al sector

rural del cantón Loja, especialmente a las parroquias rurales como son Taquil, Chuquiribamba y Chantaco.

Variación de la señal de enlace por efectos de lluvia.

De acuerdo a la banda 60 GHz, esta es susceptible a interferencias humanas y lluvias que pueden producir pérdida de la señal y/o no modular adecuadamente, lo que afectará considerablemente el rendimiento del enlace.

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta es la modulación máxima que puede lograr el enlace y que depende mucho de la distancia y factores de interferencia del entorno, como la lluvia, neblina e interferencia humana.

De acuerdo al estándar 802.11 ad, el esquema de modulación y la sensibilidad de recepción se presenta en la tabla 11.

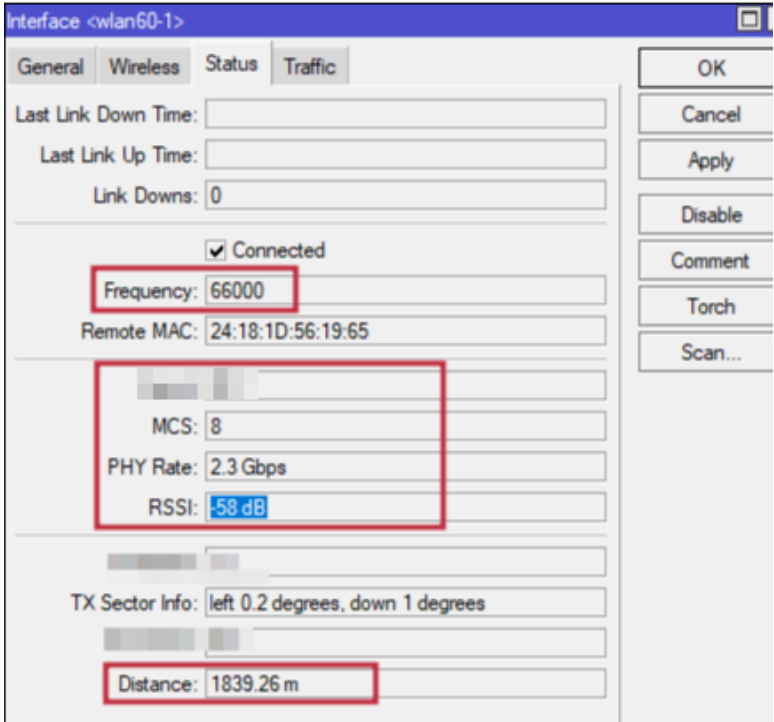
Tabla 11
Esquema de modulación y la sensibilidad de recepción

MCS		CODE RATE	Modulación	Sensibilidad del receptor. dBm	Data Rate (Mbps)
CPHY (Control PHY)	0	1/2	DPSK	- 78	27.5 Mbps
SC PHY	1	1/2	$\pi/2 - PSK$	- 68	385
	2	1/2		- 66	770
	3	5/8		- 65	962.5
	4	3/4		- 64	1155
	5	13/16		- 62	1251.25
	6	1/2	$\pi/2 - QPSK$	- 63	1540
	7	5/8		- 62	1925
	8	3/4		- 61	2310
	9	13/16		- 59	2502.5

Fuente: El autor

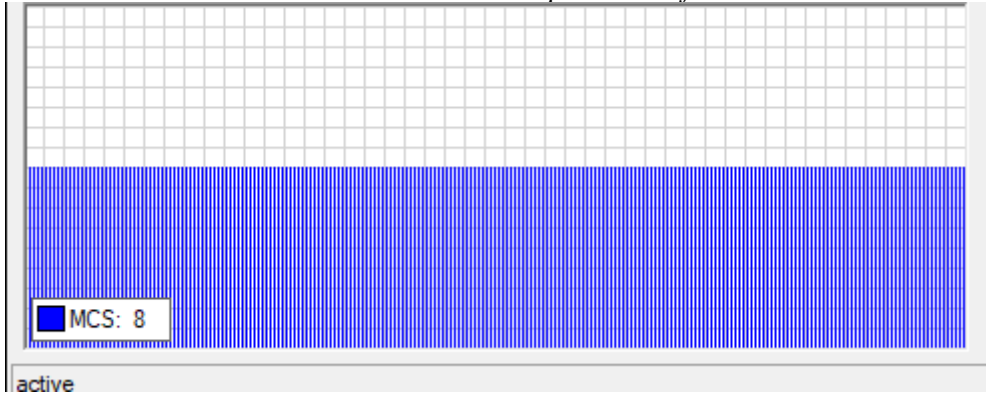
Las pruebas de enlace a 1.8 Km con el entorno ambiental sin interferencia por ejemplo humana y lluvia, el hardware es capaz de modular a 8 MCS, lo que daría como resultados un data rate de 2310.0 Mbps.

Figura 34
Capacidad física y sensibilidad de recepción de acuerdo a la modulación



Fuente: El autor

Figura 35
Estabilidad de la modulación durante determinado tiempo sin interferencia



Fuente: El autor

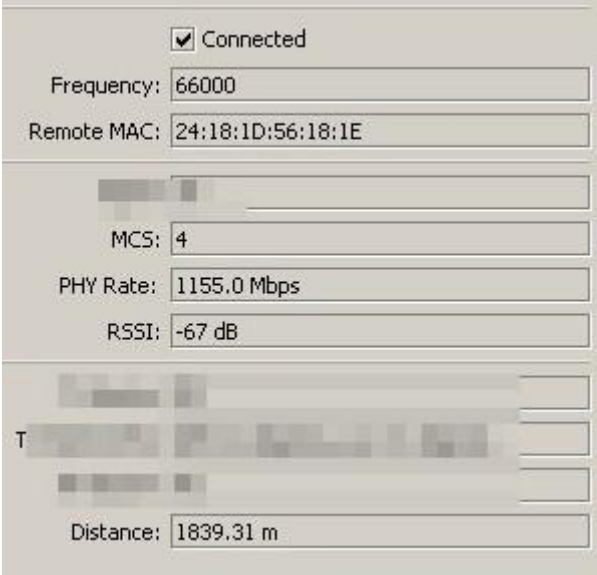
El enlace se encuentra ubicado en el sector denominado villonaco, estratégico por su altura (2600 m s. n. m), y donde el factor ambiental como la lluvia toma mucha importancia.

Se realizaron las pruebas con lluvia, la cual muestra la interacción del enlace debido a estos factores ambientales y su rendimiento del mismo debido a la sensibilidad de la banda en 60 GHz y su atenuación con respecto al fenómeno de la lluvia.

En precipitaciones moderadas de lluvia entre 2 a 15 mm/h se dan los siguientes resultados de acuerdo al enlace implementado a una distancia de 1.8 Km.

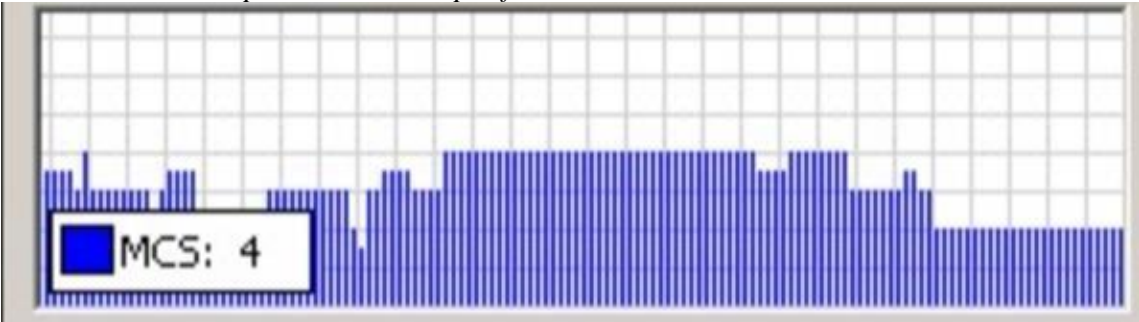
- Modulación máxima: 4 MCS
- Sensibilidad de recepción: -67 dB
- Data rate: 1155.0 Mbps

Figura 36
Sensibilidad de recepción y modulación máxima durante lluvia moderada.



Fuente: El autor

Figura 37
Inestabilidad de enlace por atenuación específica de lluvia.

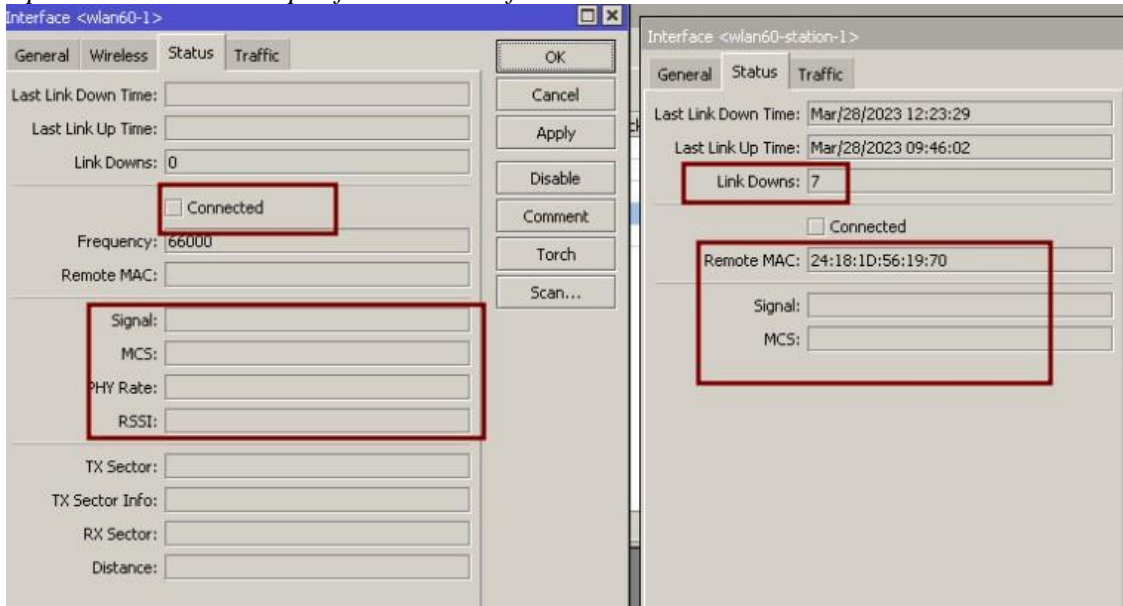


Fuente: El autor

Si la intensidad de la lluvia es fuerte, entre los 15 mm/h a 30 mm/h y debido a que los equipos son susceptibles a pérdidas por interferencias como la lluvia, el enlace se pierde totalmente

provocando una indisponibilidad al 100 %.

Figura 38
Indisponibilidad de enlace por factores atmosféricos



Fuente: El autor

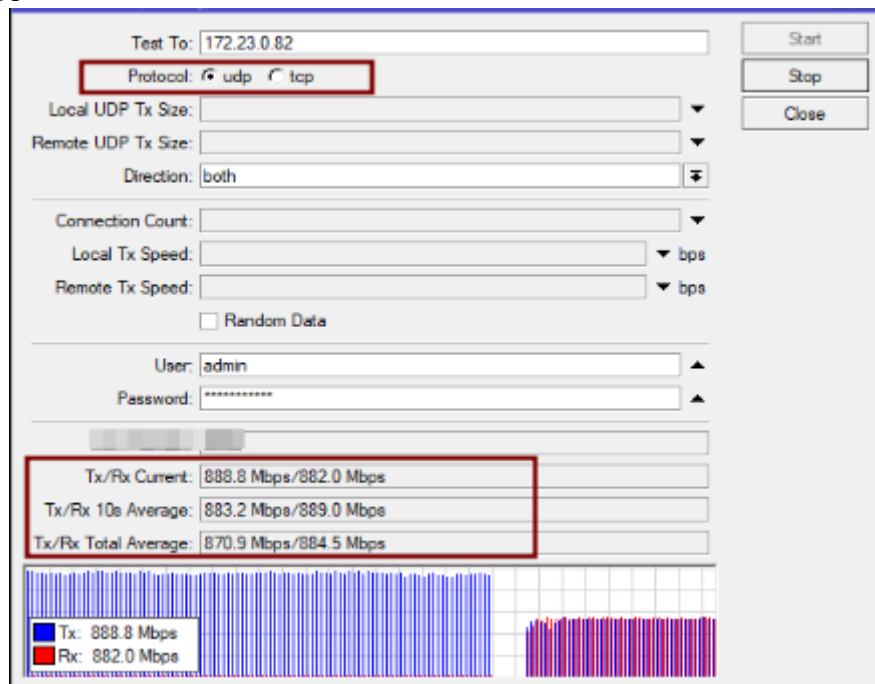
El enlace estará disponible cuando las condiciones ambientales mejoren, lo que depende totalmente de la duración de la lluvia, lo que es una desventaja frente a enlaces de backbone en 5 GHz o por ejemplo con enlaces de fibra óptica.

6.3. Objetivo 3: Examinar el throughput que manejan los equipos en 60 Ghz y su diferencia con el estándar 5 GHz para determinar ventajas y desventajas de ambos estándares.

Una vez instalados los equipos en 60 Ghz se realiza un test de velocidad utilizando la herramienta de cloudflare, nos muestra la velocidad de descarga, subida, latencia, jitter y pérdida de paquetes.

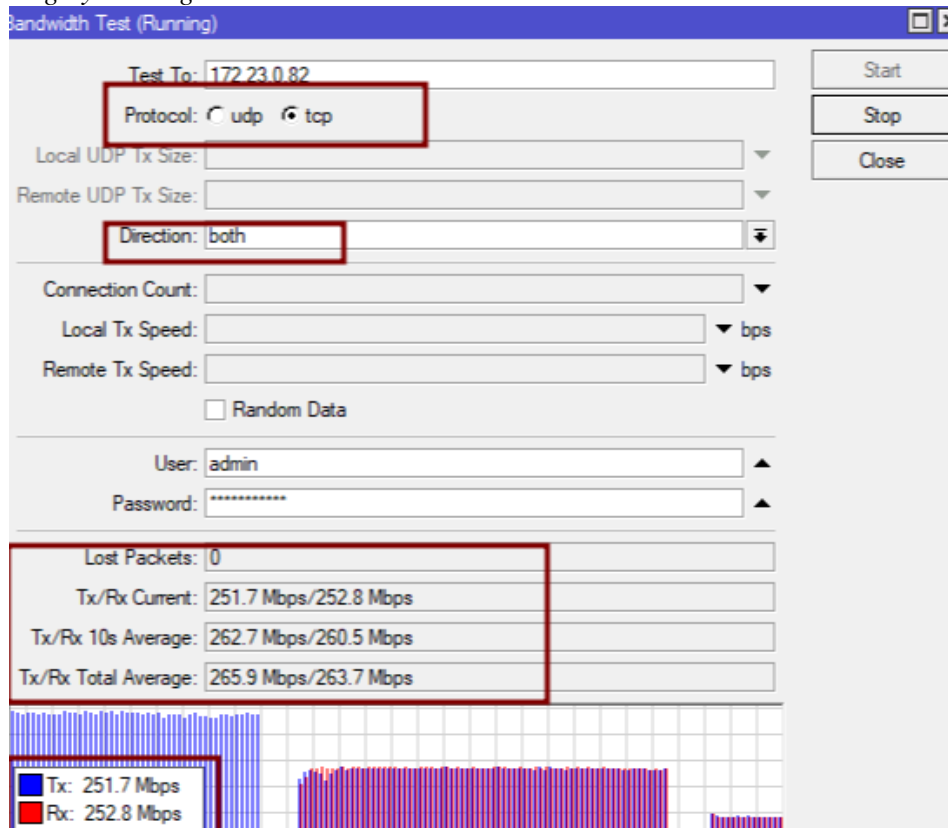
La prueba de carga y descarga en TCP y UDP entre el equipo transmisor y receptor es el siguiente.

Figura 39
Protocolo UDP



Fuente: El autor

Figura 40
Tráfico de carga y descarga en TCP.

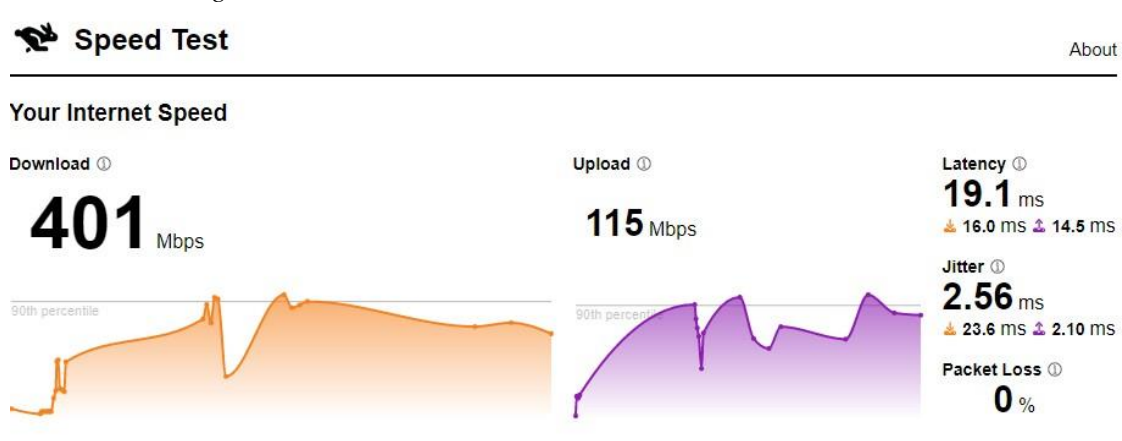


Fuente: El autor

Una vez implementado el enlace se realiza un test de velocidad para conocer la velocidad real a Internet, tanto de descarga y subida, así como su latencia con el uso de la banda de 60 GHz.

Figura 41

Velocidad de descarga en la banda de 60 GHz.



Fuente: El autor

Se obtiene una velocidad de descarga de 400 Mbps, el ping de origen desde Loja hacia un nodo de cloudflare ubicado en Guayaquil.

La latencia promedio es de 19.1 ms, y el jitter con un valor mínimo de 2.56 (descarga 23.6 ms y subida de 2.10 ms) lo que nos garantiza realizar video llamadas por aplicaciones por zoom, videos en HD y juegos online.

Prueba de enlace en la banda de 5 GHz

Se utilizan 2 equipos mikrotik para realizar un enlace en 5 GHz a la misma distancia que está funcionando el enlace en 60 GHz.

Tabla 12

Características equipo Mikrotik cube_60pro_ac

Características	cube_60pro_ac
Banda de funcionamiento	5 GHz
Wireless 5 GHz Estándar	802.11a/n/ac
Ganancia de antena en 5 GHz en dBi	11.5
Chip inalámbrico	IPQ4019
Data rate	433 Mbit/s
Consumo máximo de energía	5 W

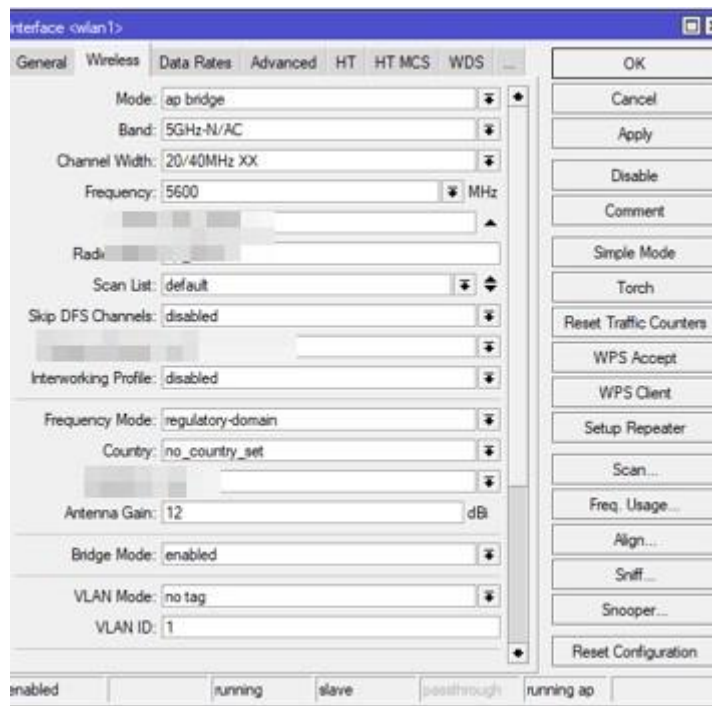
Fuente: El autor

Se configura los parámetros para el funcionamiento de los equipos en 5 GHz.

- Ancho de canal: 20/40 Mhz
- Frecuencia: 5600 Mhz
- SSID
- Estándar Wireless: 802.11 n/ac

Figura 42

Configuración de parámetros



Fuente: El autor

Establecido el enlace en la banda de 5 GHz se verifica la calidad de enlace entre el transmisor y receptor.

Figura 43

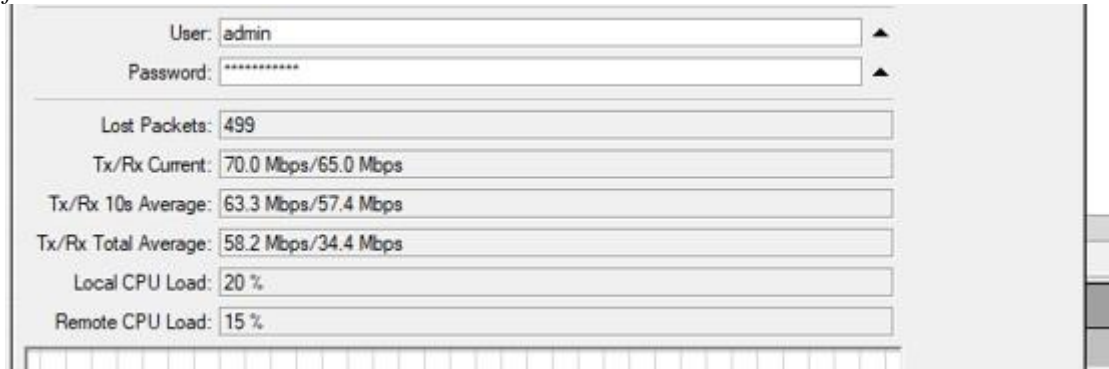
Verificación de la calidad de enlace entre el transmisor y receptor.



Fuente: El autor

Se realiza un test de carga de solo el enlace en la banda 5 GHz para determinar el throughput entre el equipo transmisor y receptor.

Figura 44
Verificación de consumo de CPU

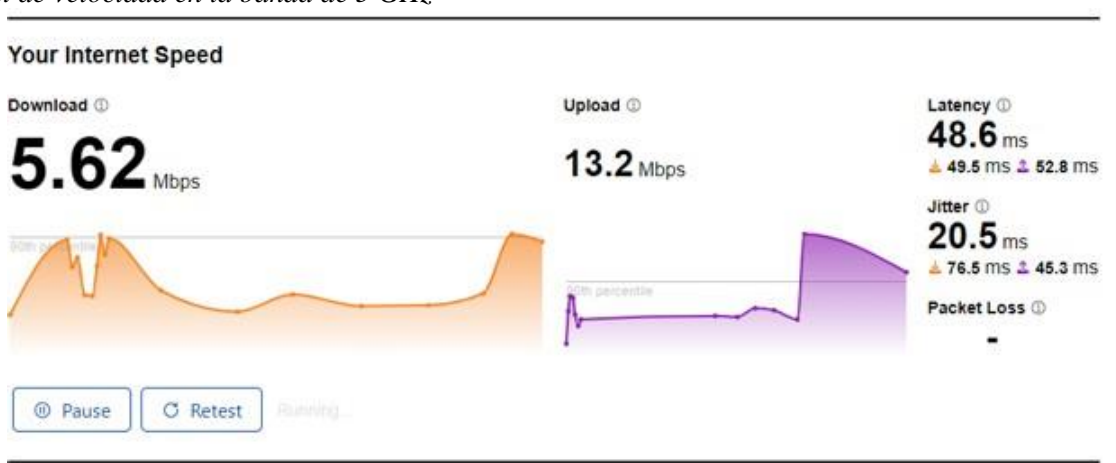


Fuente: El autor

Se verifica que el consumo de CPU no es elevado a diferencia de la banda de 60 GHz y que la tasa máxima de transmisión en la banda de 5 GHz a una distancia de 1.8 Km es de 58 Mbps para download y 34.4 Mbps para el upload.

Se implementa en enlace en 5 GHz para su uso a Internet y determinar a través de un test de velocidad la cantidad real tanto de bajada como de subida para determinar su factibilidad.

Figura 45
Test de velocidad en la banda de 5 GHz



Fuente: El autor

Test de velocidad en la banda de 5 GHz, con una latencia de 48.6 ms, Jitter de 20 ms lo siendo un enlace no factible para el servicio de Internet y no funcional para un enlace de backbone.

Figura 46

Verificación de enlace no factible para el servicio de Internet

Name	Type	Actual MTU	L2 MTU	Tx	Rx	Tx Pa
Ether2	Ethernet	1500	1598		0 bps	0 bps
wans						
WAN	Bridge	1500	1598	18.1 Mbps	17.4 Mbps	
bridge1	Bridge	1500	1598	13.4 Mbps	18.1 Mbps	
ether1-W60G Lolita Samaniego	Ethernet	1500	1598	16.3 Mbps	20.3 Mbps	
ether3-Nafanona	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps	
ether4	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps	
ether5	Ethernet	1500	1598	527.0 kbps	15.3 Mbps	
ether6	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps	
ether7	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps	
ether8	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps	

Fuente: El autor

Comparativa de tasa de transmisión entre el estándar 802.11 ac y el estándar 802.11ad a una distancia de 1.8 km de distancia.

Tabla 13

Comparativa de tasa de transmisión entre el estándar 802.11 ac y el estándar 802.11ad

Detalles técnicos.	802.11 ad	802.11a/ac
PROTOCOLO UDP		
Distancia	1.8 km	1.8 km
Tasa de velocidad alcanzada (Descarga) de enlace	1575.0 Mbps	102.7 Mbps
Tasa de velocidad alcanzada (Subida) enlace	1615.0 Mbps	54.1 Mbps
Rendimiento de CPU	90 % ~	20 % ~
Latencia en ms	<= 1 ms	<= 15 ms
PROTOCOLO TCP		
Distancia	1.8 Km	1.8 Km
Tasa de velocidad alcanzada (Descarga) de enlace	737.0 Mbps	60 Mbps
Tasa de velocidad alcanzada (Subida) enlace	791 Mbps	34.4 Mbps
Rendimiento de CPU	98 %	50 %
Latencia en ms	3 ms	20 ms
Salida a Internet		

Tasa de velocidad alcanzada (Descarga) de enlace	401 Mbps	5.62 Mbps
Tasa de velocidad alcanzada (Subida) enlace	115 Mbps	13.2 Mbps
Latencia	19.1 ms	48.6 ms

Fuente: El autor

7. Discusión.

De acuerdo con el estándar IEEE 802.11ad permite la transmisión de grandes cantidades de información por un enlace inalámbrico a una determinada distancia, es simulaciones de software como NS3 se logra transmitir tasas de información de hasta 2 Gbps a una distancia de 10 metros, así como la pérdida de señal a medida que aumenta la distancia de enlace entre 2 equipos.

Debido al desarrollo de hardware como antenas y chip Wireless compatibles con el estándar IEEE 802.11ad ha permitido que el acceso a esta tecnología sea más asequible, adquiriendo el equipamiento necesario para realizar pruebas de enlaces en ambientes con línea de vista y con factores de interferencia como la lluvia o la humana y así obtener valores más reales y específicos.

La ventaja de equipos que trabajan en el estándar IEEE 802.11ad es que permiten transmitir una gran cantidad de información a una distancia corta, la misma que depende del fabricante de antenas y/o modelos de equipos. Entre los fabricantes de equipos para realizar enlaces de backbone conocidos en Ecuador están Ubiquiti Networks, Mimoso Networks y Mikrotik. En Ubiquiti se encuentran varios modelos de equipos para realizar enlaces punto a punto en 60 GHz, pero su desventaja es su precio y requerimientos mínimos de fuente de alimentación eléctrica. En la marca Mikrotik existen varios modelos en 60 GHz y dicha marca se encuentra establecidas nivel mundial en cuanto al equipamiento de redes y equipos inalámbricos, los precios de equipamiento en 60 GHz no supera los \$250 dependiendo del modelo y los requerimiento de fuente de energía varían entre los 12 a 24 v, así como el consumo máximo de energía que está entre los 5w a 11w lo que hace ideal para entornos con energía solar y brindar el servicio en áreas rurales.

De acuerdo a la ficha técnica del equipo del fabricante Mikrotik una distancia mínima recomendable con LoS sería a 500 a 800 metros en donde el enlace implementado permitirá un throughput aproximadamente de 1 Gbps, pero debido a la longitud de onda de la banda de 60 GHz que es una onda milimétrica, esta es sensible a factores ambientales como una lluvia moderada o interferencia humana, lo que produce la indisponibilidad del enlace hasta un determinado tiempo.

El estándar WIFI que se conoce actualmente como 802.11 a/b/g/n/ac y actualmente WIFI 6, trabajan en la banda de 2.4 GHz y 5 GHz, pero debido a la gran cantidad de dispositivos finales y equipos que funcionan como router, access point, provocan una saturación del espectro lo que produce una degradación de servicios como el stream, servicios de videollamada, juegos online.

El incremento de la frecuencia a 20, 30, 40, 60 GHz, conlleva a una reducción de la longitud de onda que evita interferencias por el espectro radioeléctrico, debido a su alta directividad y tamaño del ancho de banda (en GHz) lo que en un futuro terminaría con los problemas de WIFI por saturación del espectro.

8. Conclusiones

Luego de la realización del presente Trabajo de Titulación se obtuvieron las siguientes conclusiones

- Investigación y desarrollo del estándar 802.11ad ha permitido la evolución de hardware en Wireless como los chips, antenas y equipos, mejorando la calidad y experiencia del servicio inalámbrico.
- Los enlaces que funcionan en 60 GHz permiten transportar una gran cantidad de información de manera inalámbrica, limitado por ciertos factores como la distancia de enlace y fenómenos ambientales como la lluvia.
- Existe una gran diferencia entre el estándar IEEE 802.11 n/ac y el IEEE 802.11ad respecto a la tasa de transmisión de datos, con enlaces de 60 GHz se puede transmitir inalámbricamente de hasta 1 Gbps, mientras que con el estándar 802.11ac conocido como WIFI 5 la tasa de transmisión puede ser hasta 5 veces menor.
- La banda de 60 GHz sin licencia está disponible en todo el mundo, permite el uso de ancho de banda de canal muy amplio, alrededor de 2.16 Ghz lo que hace que su rendimiento sea muy amplio a distancias cortas que lo hace factible para transmisiones de video en 4K, juegos en línea, realidad virtual.
- La longitud de onda es de aproximadamente 5 mm, lo que hace posible el uso de antenas y equipamiento en un espacio muy compacto evitando interferencias y por el uso de frecuencias a diferencia de la banda de 5 GHz o 2.4 GHz que saturan el espectro, depreciando la calidad de conexión

9. Recomendaciones

Luego de la realización del presente Trabajo de Titulación se emiten las siguientes recomendaciones:

- Analizar diseño y funcionamiento de las antenas en 60 GHz, su conformación de haces para mejorar la relación señal ruido.
- Analizar el desempeño del estándar 802.11ad con dispositivos en movimiento e interferencia humana para analizar su atenuación, modulación máxima y data rate que pueda alcanzar.
- Analizar los estándares IEEE 802.11ad y el estándar mejorado como es el IEEE 802.11ay para el diseño y creación de antenas transmisoras y receptores para su implementación en dispositivos móviles.

Trabajos Futuros

- Se recomienda la ampliación del presente trabajo de titulación en entornos como oficinas para la interconexión de equipos y usuarios, así como el rendimiento de los mismos en paredes y columnas.
- Analizar la ventaja del uso de ondas milimétricas con licenciamiento libre para el sector rural y su beneficio económico.

10. Bibliografía

- 802.11 WG - Wireless LAN Working Group. (2012, diciembre 28). *IEEE 802.11ad-2012*. IEEE SA - IEEE 802.11ad-2012. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ad/4527/>
- Aggarwal, S., Kong, Z., Ghoshal, M., Hu, Y. C., & Koutsonikolas, D. (2021). Throughput Prediction on 60 GHz Mobile Devices for High-Bandwidth, Latency-Sensitive Applications. En O. Hohlfeld, A. Lutu, & D. Levin (Eds.), *Passive and Active Measurement* (Vol. 12671, pp. 513-528). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72582-2_30
- Assasa, H., & Widmer, J. (2016). Implementation and Evaluation of a WLAN IEEE 802.11ad Model in ns-3. *Proceedings of the Workshop on Ns-3 - WNS3 '16*, 57-64. <https://doi.org/10.1145/2915371.2915377>
- Banerji, S., & Chowdhury, R. S. (2013). On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, 3(4), 45-64. <https://doi.org/10.5121/ijmnct.2013.3405>
- Bellalta, B. (2016). IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANS. *IEEE Wireless Communications*, 23(1), 38-46. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422404>
- Bielsa, G., Loch, A., Tejado, I., Nitsche, T., & Widmer, J. (2019). 60 GHz Networking: Mobility, Beamforming, and Frame Level Operation from Theory to Practice. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18(10), 2217-2230. <https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2875095>
- Fadilah, S. I., Shibghatullah, A. S., Abas, Z. A., Wahab, M. H. A., & Hashim, N. W. (2014). *PERFORMANCE ANALYSIS FOR WIRELESS G (IEEE 802.11G) AND WIRELESS N (IEEE 802.11N) IN OUTDOOR ENVIRONMENT*. 9(10).
- ITU-R. (2015). *Sistemas inalámbricos de múltiples gigabits en frecuencias en torno a 60 GHz*.

- ITU-R. (2017). Atenuación debida a los gases atmosféricos. *ITU*.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-I!!PDF-S.pdf
- Kim, J., Xian, L., & Sadri, A. S. (2017). 60 GHz Modular Antenna Array Link Budget Estimation with WiGig Baseband and Millimeter-Wave Specific Attenuation. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 1-9.
<https://doi.org/10.1155/2017/9073465>
- Mikrotik. (2023). *Cube 60Pro ac*. Mikrotik Products: Cube 60Pro AC.
https://mikrotik.com/product/cube_60pro_ac
- Nabetani, T., & Harada, H. (2022). *Full Duplex for IEEE 802.11 Wireless LANs* [Preprint].
<https://doi.org/10.36227/techrxiv.21580197.v1>
- Nitsche, T., Cordeiro, C., Flores, A., Knightly, E. W., Perahia, E., & Widmer, J. C. (s. f.). *IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gbps Wi-Fi*.
- Pere Burkle, M. G. & Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2017). *Análisis de la banda de 60 GHz para su posible clasificación como espectro libre*.
<https://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/9428/documentos/documentodereferencia-analisisdelabandade60ghzaccessible.pdf>
- Rochim, A. F., & Sari, R. F. (2016). Performance comparison of IEEE 802.11n and IEEE 802.11ac. *2016 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA)*, 54-59. <https://doi.org/10.1109/IC3INA.2016.7863023>
- Selvam, T., & Srikanth, S. (2009). Performance study of IEEE 802.11n WLANs. *2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/COMSNETS.2009.4808917>
- Sharma, M. S., & Shah, R. (2014). Comparative Study of IEEE 802.11 a, b, g & n Standards. *International Journal of Engineering Research*, 3(4).

Sur, S., Pefkianakis, I., Zhang, X., & Kim, K.-H. (2017). WiFi-Assisted 60 GHz Wireless Networks. *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 28-41. <https://doi.org/10.1145/3117811.3117817>

Ubiquiti. (2022, abril 19). *UISP airFiber 60 LR*. UISP AirFiber 60 LR. <https://store.ui.com/collections/operator-airmax-and-ltu/products/airfiber-60-lr>

11. Anexos

Anexo 1: Data Sheet airFiber 60 LR

airFiber 60 LR

60 GHz point-to-point (PtP) radio system with a 1.9 Gbps maximum throughput rate and a 12+ kilometer link range.

The airFiber 60 GHz Long-range Radio (AF60 LR) is a PtP system that uses Wave Technology to establish long-distance, true-duplex Gigabit links. Equipped with a high-gain dish antenna, the AF60 LR can reach a 1.9 Gbps maximum throughput rate and sustain its links over 12 km. It also has a dedicated Bluetooth management radio so it can be set up quickly and fully configured with the UISP® application (web/mobile). It can also be seamlessly integrated into an existing deployment with Ubiquiti's dedicated link planning platform and tracked from anywhere with its built-in GPS antenna.



Mechanical

Dimensions	Ø413 x 360 mm (Ø16.3 x 14.2")
Weight	Without mount: 1.5 kg (3.3 lb) With mount: 2.7 kg (6 lb)
Enclosure materials	Aluminum, UV stabilized polycarbonate
Mount material	Galvanized steel
Mounting	Precision Alignment Kit (included) Pole compatibility: Ø25.4-76.2 mm (Ø1-3")
Wind loading	420 N at 200 km/h (94.4 lbf at 125 mph)

Hardware

Processor	Quad-Core ARM® Cortex® A7
Memory	256 MB DDR3
Networking interface	GbE RJ45 port
RF connections	Internal
Max. power consumption	18W
Power method	Passive PoE 4-pairs (1, 2+; 3, 6-) (4, 5+; 7, 8-) or 2-pairs (4, 5+; 7, 8-)
Power supply	48VDC, 0.65A gigabit PoE adapter (included)
Supported voltage range	48VDC ± 10%
ESD/EMP protection	Air/contact: ± 24kV
Operating temperature	-40 to 60° C (-40 to 140° F)
Operating humidity	5 to 95% noncondensing
Certifications	FCC, IC, CE

RF

Operating Frequency*	57-71 GHz <small>*Depends on regulatory region.</small>
GPS	Yes
Channel Bandwidth	2160, 1080 MHz

Anexo 2: Recomendación UIT-R P.838-3, Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
48	0,6172	0,8187	0,6037	0,7967
49	0,6386	0,8134	0,6255	0,7918
50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
51	0,6811	0,8034	0,6687	0,7826
52	0,7020	0,7987	0,6901	0,7783
53	0,7228	0,7941	0,7112	0,7741
54	0,7433	0,7896	0,7321	0,7700
55	0,7635	0,7853	0,7527	0,7661
56	0,7835	0,7811	0,7730	0,7623
57	0,8032	0,7771	0,7931	0,7587
58	0,8226	0,7731	0,8129	0,7552
59	0,8418	0,7693	0,8324	0,7518
60	0,8606	0,7656	0,8515	0,7486
61	0,8791	0,7621	0,8704	0,7454
62	0,8974	0,7586	0,8889	0,7424
63	0,9153	0,7552	0,9071	0,7395
64	0,9328	0,7520	0,9250	0,7366
65	0,9501	0,7488	0,9425	0,7339
66	0,9670	0,7458	0,9598	0,7313
67	0,9836	0,7428	0,9767	0,7287
68	0,9999	0,7400	0,9932	0,7262
69	1,0159	0,7372	1,0094	0,7238
70	1,0315	0,7345	1,0253	0,7215
71	1,0468	0,7318	1,0409	0,7193
72	1,0618	0,7293	1,0561	0,7171
73	1,0764	0,7268	1,0711	0,7150
74	1,0908	0,7244	1,0857	0,7130
75	1,1048	0,7221	1,1000	0,7110
76	1,1185	0,7199	1,1139	0,7091
77	1,1320	0,7177	1,1276	0,7073
78	1,1451	0,7156	1,1410	0,7055
79	1,1579	0,7135	1,1541	0,7038
80	1,1704	0,7115	1,1668	0,7021

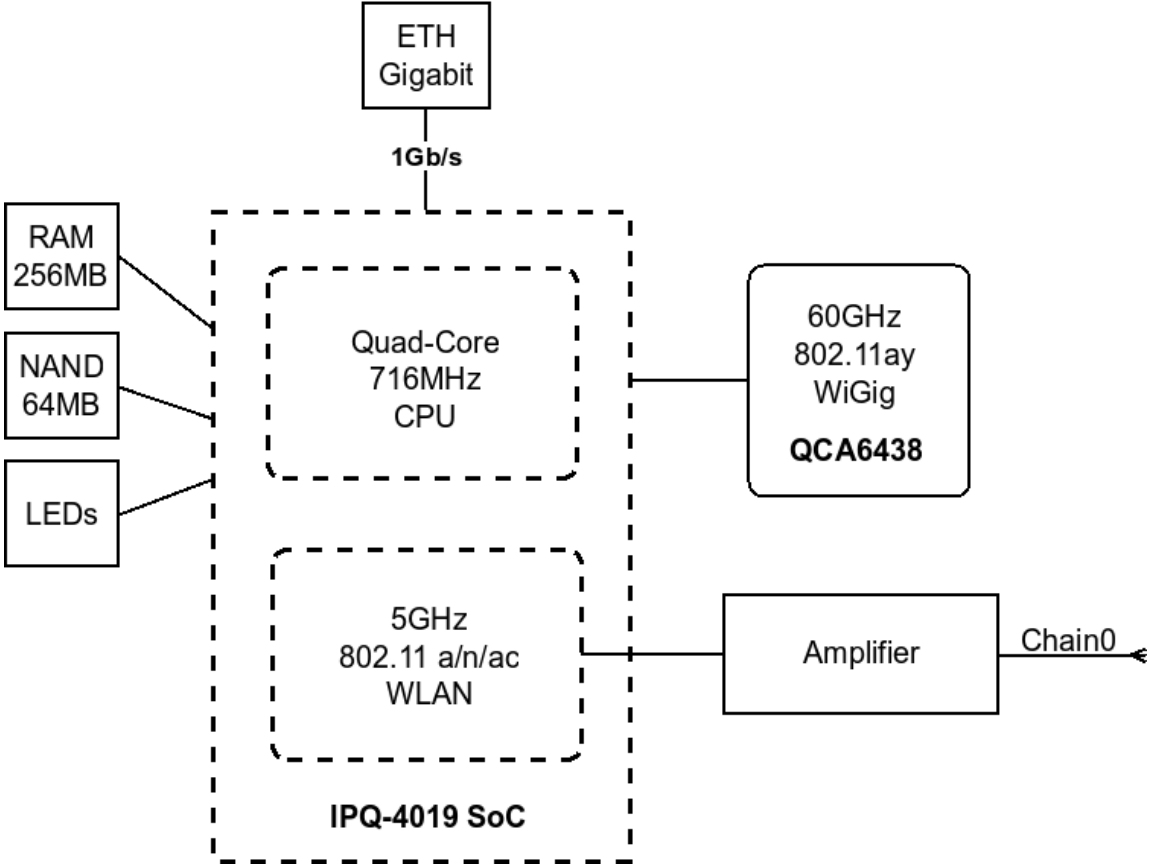
Anexo 3: Data Sheet Equipo Mikrotik 60 GHz

Product code	CubeG-5ac60ay / CubeG-5ac60ay-SA
CPU	4 core IPQ-4019 716 MHz
Size of RAM	256 MB
Storage	64 MB flash
Number of 1G Ethernet ports	1
Wireless	5 GHz 802.11a/n/ac
Wireless Chains	1
Antenna gain (dBi)	11.5 5 GHz
Antenna beam width	35° 5 GHz
Antenna beam width at 60 GHz	11° (CubeG-5ac60ay); 60° (CubeG-5ac60ay-SA)
GPS	MT3337V
WiGig chipset	QCA6438
WiGig antenna module	SWL-QD46
Supported protocol	MikroTik 802.11ad / 802.11ay
Max EIRP (dBm)	40
Dimensions	115 x 95 x 82 mm (CubeG-5ac60ay) 115 x 211 x 90 mm (Cube G-5ac60ay-SA)
Operating temperature	-40°C to +70°C
Operating system	RouterOS, License level 4

Wireless specifications

Details	
Wireless 5 GHz Max data rate	433 Mbit/s
Wireless 5 GHz number of chains	1
Wireless 5 GHz standards	802.11a/n/ac
Antenna gain dBi for 5 GHz	11.5
Wireless 5 GHz chip model	IPQ4019
Wireless 5 GHz generation	Wi-Fi 5

Cube 60Pro ac (RBCubeG-5ac60ay)



Anexo 4: Certificado de traducción del Resumen

Loja, 11 de mayo de 2023

CERTIFICACIÓN DE TRADUCCIÓN

Doctora Erika Lucía González Carrión, Ph.D.
Docente de la Facultad de la Educación, el Arte y la Comunicación
Universidad Nacional de Loja

CERTIFICO:

En mi calidad de traductora del idioma Inglés, con capacidades que pueden ser probadas a través de las traducciones realizadas para revistas de alto impacto como: Comunicar(Q1): <https://bit.ly/3v0JggL>, así como a través de la Certificación de conocimiento del Inglés, nivel B2, que la traducción del Resumen (Abstract) del Trabajo de Titulación denominado: **Evaluación del desempeño del estándar 802.11ad (60 GHz) para enlaces de backbone para distancias cortas en ambientes con LOS (línea de vista).**; de la autoría de: **Robert Iván Loarte Caraguay**, con CI: 1104149578, es correcta y completa, según las normas internacionales de traducción de textos.

Es cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado, **Robert Iván Loarte Caraguay**, hacer uso legal del presente, según estime conveniente.

Atentamente,



Dra. Erika González Carrión. PhD.
Docente de la Facultad de la Educación, el Arte y la Comunicación
Universidad Nacional de Loja