



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

TEMA:

“EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC CON TECNOLOGÍA
MU-MIMO EN COMPARACIÓN AL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA EN
REDES DE TRANSPORTE DE DATOS.”

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Protocolos de comunicación.

AUTOR: Darío Gabriel López López

TUTOR: Ing. Geovanni Danilo Brito Moncayo, Mg

AMBATO - ECUADOR

Mayo 2018

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Investigación sobre el tema: "EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC CON TECNOLOGÍA MU-MIMO EN COMPARACIÓN AL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA EN REDES DE TRANSPORTE DE DATOS", desarrollado por el señor Darío Gabriel López López estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Mayo 2018

EL TUTOR



Ing. Giovanni Brito, Mg

AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: “EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC CON TECNOLOGÍA MU-MIMO EN COMPARACIÓN AL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA EN REDES DE TRANSPORTE DE DATOS”, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Mayo 2018.

EL AUTOR



Darío Gabriel López López

C.I.: 1804012662

DERECHOS DEL AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato Mayo, 2018



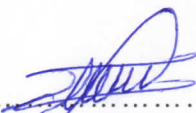
Darío Gabriel López López

C.I.: 1804012662

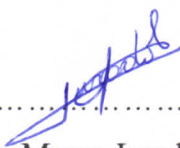
APROBACIÓN DEL COMISIÓN CALIFICADORA

La Comisión Calificadora del presente Trabajo de Investigación, conformada por los señores docentes **Ing. Marco Antonio Jurado Lozada, Mg.** y **PhD. Carlos Gordon,** los cuales revisaron y aprobaron el Informe Final del proyecto de Investigación titulado "EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC CON TECNOLOGÍA MU-MIMO EN COMPARACIÓN AL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA EN REDES DE TRANSPORTE DE DATOS", presentado por el señor Darío Gabriel López López, de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

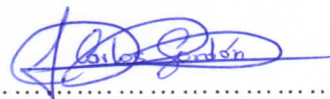
Ambato, Mayo 2018



.....
M. Sc Pilar Urrutia
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



.....
Ing. Marco Jurado, Mg
DOCENTE CALIFICADOR



.....
PhD. Carlos Gordon
DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación está dedicado a toda mi familia que gracias a su incentivo me motivaron a continuar mis estudios, de manera especial a mi madre, quien ha sido el motor y motivo para impulsarme hacia adelante, por su apoyo incondicional y constante motivación, no me alcanzará la vida para agradecerle todo lo que ha cultivado en mí.

Finalmente, a quienes siempre me apoyaron y en todo momento confiaron en mí.

Darío Gabriel López López

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia que de una u otra manera me han motivado a seguir estudiando y seguir adelante, sus palabras de apoyo me han permitido llegar a donde hoy me encuentro. Fundamentalmente a mi abuelo Luis, un especial agradecimiento y mi eterna admiración, por su calidad, calidez humana y su pensamiento crítico.

El infinito agradecimiento al Ingeniero Geovanny Brito, por su apoyo en la realización de este proyecto, así como por la oportunidad de obtener una amplia experiencia en el campo de las telecomunicaciones.

A todos los profesores de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, esperando sigan fomentando en los estudiantes el ser buenos profesionales y también el sentirse orgullosos de pertenecer a la F.I.S.E.I. y a la Universidad Técnica de Ambato.

A mis amigos quienes forman parte de mi vida, son un factor importante en este proceso de crecimiento personal, a Karina por su especial forma de ser y finalmente un gracias a todas las personas que han estado presentes en cada etapa de mi vida.

Darío Gabriel López López

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DEL AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL COMISIÓN CALIFICADORA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA	1
1.1. Tema de investigación.....	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	1
1.3. Delimitación.....	2
1.3.1. Delimitación de contenidos.....	2
1.3.2. Delimitación espacial	2
1.3.3. Delimitación temporal.....	2
1.4. Justificación.....	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. General	4
1.5.2. Específicos	4
CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes Investigativos.....	5
2.2. Redes de Transporte.....	8
2.2.1. Medios de transmisión	9
2.3. Fibra Óptica.....	10
2.3.1. Ventajas de la Fibra Óptica	11
2.3.2. Desventajas de la Fibra Óptica.....	12

2.3.3.	Propagación de la fibra óptica.....	13
2.3.4.	Ley de Snell, índice de refracción.....	14
2.3.5.	Tipos de fibra óptica.....	14
2.3.6.	Sistemas de Comunicaciones Ópticas Punto a Punto	16
2.3.7.	Ventanas de Operación de la Fibra Óptica.....	16
2.3.8.	Redes de Transporte en Fibra Óptica OTN.....	18
2.3.9.	Multiplexación por división de longitud de Onda WDM	18
2.3.10.	Propiedades de transmisión de la fibra óptica.....	21
2.3.11.	Estándares de las Fibras Ópticas	22
2.4.	Redes de Transporte Inalámbricas	23
2.4.1.	Ventajas de las Redes Inalámbricas	24
2.4.2.	Desventajas de las Redes Inalámbricas.....	25
2.4.3.	IEEE 802 LAN/MAN	25
2.4.4.	Diferencia de nombres de IEEE802.11 y WiFi.....	26
2.4.5.	Enmiendas 802.11	26
2.4.6.	Aspectos técnicos IEEE 802.11	28
2.4.7.	Técnicas de modulación.....	33
2.5.	Tecnología MIMO	35
2.6.	Simulador NS-3.....	51
2.6.1.	Entorno de desarrollo	51
2.6.2.	Modelos de simulación	52
2.6.3.	Tecnologías	52
2.7.	Propuesta de Solución.....	55
CAPÍTULO III.....		56
METODOLOGÍA		56
3.1.	Modalidad de la investigación	56
3.2.	Recolección de Información	56
3.3.	Procesamiento y Análisis de Datos	56
3.1.	Desarrollo del proyecto	57
CAPÍTULO IV.....		58
DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....		58
4.1.	Introducción	58
4.2.	Factibilidad.....	58

4.2.1.	Factibilidad técnica	58
4.2.2.	Factibilidad bibliográfica	59
4.2.3.	Factibilidad económica	59
4.3.	Requerimientos	59
4.4.	Cuadros descriptivos redes ópticas	59
4.5.	Cuadro descriptivos MU-MIMO IEEE 802.11ac.	60
4.6.	Simulación de Redes de Transporte de Datos.....	61
4.6.1.	Esquema de simulaciones	62
4.6.2.	Criterios de diseño en redes de Fibra óptica	63
4.6.3.	Diagrama de Flujo en la Simulación de redes de Fibra Óptica.....	63
4.6.4.	Criterios de diseño en redes IEEE 802.11ac	65
4.6.5.	Diagrama de Flujo en la Simulación de redes IEEE802.11ac	66
4.6.6.	Definición de Módulos o Librerías	67
4.6.7.	Programación de redes de fibra óptica DWDM.....	68
4.6.8.	Programación de redes bajo el estándar IEEE802.11	72
4.6.9.	Razón de transferencia de datos o Throughput	76
4.7.	Interpretación de resultados en redes de Fibra Óptica	76
4.8.	Interpretación de Resultados en redes Inalámbricas	79
4.9.	Cuadro de evaluación de Medios Guiados y No Guiados.....	85
4.10.	Presupuesto	97
CAPÍTULO V.		99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		99
5.1.	Conclusiones	99
5.2.	Recomendaciones.....	100
Bibliografía		102
Anexos.....		108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fibra OM1, OM2, OM3 [29]	15
Tabla 2 Fibra OM4, OS2 [29]	16
Tabla 3 Ventanas de operación de la fibra óptica [31].....	17
Tabla 4 Parámetros Estándar 802.11 [41]	28
Tabla 5 Valores de MCS para 802.11ac [45].....	49
Tabla 6 Ventajas y desventajas de la Fibra Óptica	60
Tabla 7 Comparativa CWDM y DWDM	60
Tabla 8 Ventajas y desventajas de las redes inalámbricas	61
Tabla 9 Características MU-MIMO	61
Tabla 10 Throughput de F.O. en relación a la distancia 1-10Km	77
Tabla 11 Throughput en relación a la distancia 10-50Km	78
Tabla 12 Throughput WLAN en el ancho de canal de 20Mhz	80
Tabla 13 Throughput en canal de 40Mhz	81
Tabla 14 Throughput WLAN en un ancho de canal de 80Mhz	82
Tabla 15 Throughput WLAN en un ancho de canal de 160Mhz	83
Tabla 16 Cuadro Comparativo medios guiados y no guiados.....	86
Tabla 17 Estimación de costos para una red de transporte inalámbrica	92
Tabla 18 Estimación de costos para una red de transporte con fibra óptica	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de redes de telecomunicaciones [19]	9
Figura 2 Fibra Óptica [22].....	11
Figura 3 El estándar IEEE 802.11 y el modelo de referencia OSI [41]	29
Figura 4 Formato de trama MAC en el estándar 802.11. [41]	32
Figura 5 Esquema general de operación de un sistema MIMO [43].....	41
Figura 6 Concepto básico de MU-MIMO [43]	43
Figura 7 Diseños de canal en 802.11ac [45]	46
Figura 8 Máscara espectral [45].....	47
Figura 9 Mapa de canales disponibles para 802.11ac [45]	48
Figura 10 Diagrama de flujo en la simulación de redes de Fibra Óptica.....	65
Figura 11 Diagrama de flujo en la simulación de redes IEEE802.11ac.....	67
Figura 12 Programación DWDM en NS-3, sección inicial.....	71
Figura 13 Programación DWDM en NS-3, sección red óptica.....	71
Figura 14 Programación red IEEE802.11ac en NS-3, sección inicial	75
Figura 15 Programación IEEE802.11ac en NS-3, sección red	76
Figura 16 Captura de pantalla simulación DWDM en NS-3-WDM.....	77
Figura 17 Throughput de F.O. en relación a la distancia 1-10Km.....	78
Figura 18 Throughput de F.O. en relación a la distancia 10-50Km.....	79
Figura 19 Captura de pantalla de red con el estándar IEEE802.11ac en NS-3	80
Figura 20 Throughput WLAN en un ancho de canal de 20Mhz.....	81
Figura 21 Throughput WLAN en un ancho de canal de 40Mhz.....	82
Figura 22 Throughput WLAN en un ancho de canal de 80Mhz.....	83
Figura 23 Throughput WLAN en un ancho de canal de 160Mhz.....	84
Figura 24 Visualización de AirControl en laboratorio.....	87
Figura 25 Capacidad del enlace en RX1 AirFiber 5 en laboratorio.....	88
Figura 26 Capacidad del enlace en RX2 AirFiber 5 en laboratorio.....	88
Figura 27 AirLink Visualización de las características del Enlace	89
Figura 28 Traslado de Antena Master a la Torre	90
Figura 29 Colocación de Antena Esclavo en la Torre.....	90
Figura 30 Capacidad real del enlace AirFiber 5.....	91
Figura 31 Longitud referencial del enlace de Fibra Óptica.....	92

RESUMEN

Una red de transporte de datos contiene los elementos necesarios que hacen posible el traslado de grandes volúmenes de información provenientes de las redes de acceso, permitiendo a su vez alcanzar cualquier extensión geográfica, esto se lo debe hacer con la mayor rapidez, seguridad y confiabilidad. El medio guiado de mayores beneficios en este tipo de redes es la fibra óptica que, por medio de las diferentes tecnologías de transmisión de datos permiten el flujo de grandes volúmenes de información, además también es necesario llevar información a largas distancias y a sitios de difícil acceso físico, para lo cual se utiliza el medio no guiado, en donde se ha desarrollado el estándar IEEE 802.11ac, que cumple los requerimientos de ancho de banda necesarias en este tipo de redes.

En este proyecto se han generado modelos de redes de transporte de datos virtuales para medios guiados utilizando fibra óptica y no guiados por medio del estándar IEEE802.11ac, permitiendo estimar la capacidad de transferencia y el rendimiento que se puede alcanzar en el mundo real. En la evaluación se utiliza el software de simulación NS-3, debido a que permite simular protocolos de red por medio de eventos discretos, el módulo NS-3-WDM contiene los componentes requeridos para la simulación de redes ópticas del tipo DWDM, mientras que la versión ns-3-allinone permite la simulación de redes inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11ac. Para efectos de la evaluación se toma en cuenta principalmente la obtención de la capacidad de transmisión con relación al ancho de banda disponible o a la distancia, por ser un factor determinante al momento de diseñar una red de este tipo.

Palabras clave: IEEE802.11ac, MU-MIMO, DWDM, Simulación, NS-3.

ABSTRACT

A backhaul contains the necessary elements to make it possible to transfer large volumes of information coming from the access networks, allowing once more something else, this can be done with the greatest speed, security and reliability. The guided medium of greater benefits in this type of networks is fiber optic, which, by the type of data transmission networks, also allows access to sites of difficult physical access, for which the unguided medium is used, where the IEEE 802.11ac standard has been developed, which fulfills the necessary bandwidth requirements in this type of networks.

In this project, virtual transport network models have been generated for graphic media with fiber optics and without devices for the medium of the IEEE802.11ac standard, which allows estimating the transfer capacity and performance that can be achieved in the real world. The NS-3 simulation software is used in the evaluation, because it allows simulated color protocols through discrete events. The NS-3-WDM module contains the necessary components for the simulation of optical networks of the DWDM type. The ns-3-allinone version allows the simulation of wireless networks under the IEEE 802.11ac standard. For the purpose of the evaluation, the obtaining of the transmission capacity in relation to the available bandwidth or distance was taken into account, since it is a determining factor when designing a red one of this type.

Keywords: IEEE802.11ac, MU-MIMO, DWDM, Simulation, NS-3.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación se lo ha desarrollado con el afán de evaluar el estándar inalámbrico IEEE802.11ac con tecnología MU-MIMO en redes de transporte de grandes volúmenes de información con relación a redes de transporte por medio de fibra óptica, la finalidad es ayudar a las instituciones que desean implementar nuevas tecnologías en las mismas debido a la migración tecnológica. Para esto es necesario conocer el ambiente físico en el cual va a ser implementado la red de transporte de datos, pues los requerimientos previos permiten determinar la tecnología adecuada garantizando así un buen desempeño de la red de transporte de datos planteada.

El continuo avance en la investigación por parte del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), genera una constante actualización de información del estándar 802.11ac sobre su forma de operación en redes de transporte de datos, por lo cual se dificulta la simulación directa en NS-3. Para la simulación es necesario definir las redes de transporte de datos como redes ideales, de distancia infinita y potencia constante, logrando con ello acoplarlas al módulo 802.11 contenido en NS-3.

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado bajo la siguiente estructura:

Primer Capítulo: Se plantea los problemas, así como como la justificación del porqué del desarrollo del proyecto, poniendo énfasis en la aplicabilidad que puede tener dentro de ambientes de alto tráfico de información, además se plantean los objetivos que determinan los resultados a alcanzar.

Segundo Capítulo: Permite definir información sobre los conocimientos teóricos necesarios a conocer en el desarrollo de redes de transporte tanto por medio de fibra óptica, así como por medio del estándar inalámbrico IEEE802.11ac.

Tercer Capítulo: Determina la metodología aplicada en la investigación y las actividades necesarias que conllevan al cumplimiento de los objetivos.

Cuarto Capítulo: Corresponde a describir los pasos realizados en la demostración de la aplicabilidad del estándar 802.11ac MU-MIMO y por medio de fibra óptica, en redes de transporte de datos.

Quinto Capítulo: Al cumplir los objetivos se determinan las conclusiones obtenidas de la realización del proyecto de investigación y se emite las recomendaciones correspondientes.

CAPÍTULO I.

EL PROBLEMA

1.1. Tema de investigación

“EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC CON TECNOLOGÍA MIMO EN COMPARACIÓN AL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA EN REDES DE TRANSPORTE DE DATOS.”

1.2. Planteamiento del Problema

Al optimizar las redes de datos se presenta un problema complejo, pues las aplicaciones masivas disponibles en internet tienden a usar todo el ancho de banda disponible, saturando con ello los enlaces. Esta saturación normalmente provoca una baja calidad de servicio del resto de las aplicaciones montadas en la red, esto se debe a que la mayoría de los enlaces llevan datos sobre la pila de protocolos TCP/IP, en los cuales, para que puedan funcionar correctamente se montan más aplicaciones de determinadas características, como requerimientos de pseudo tiempo real, determinada tolerancia en el jitter y requerimientos de ancho de banda. [1]

El progreso constante de las tecnologías de la información, en especial las aplicaciones en internet han permitido que el trabajo en casa sea más frecuente, la evolución del internet de las cosas, retransmisión de eventos con vídeo por streaming, televisión por internet y demás, lo cual acarrea una serie de problemas en las redes de transporte, pues el crecimiento de los volúmenes de información la saturan rápidamente presentando inconvenientes con la disponibilidad de la información, dificultades de conectividad, velocidad de transferencia, entre otros. [2] , [3]

La fibra óptica como medio de transporte de información presenta una serie de problemas de uso frente a otros medios de transmisión por medios guiados, siendo las más relevantes, la necesidad de usar transmisores y receptores más caros, el agua corroe la superficie del vidrio y resulta ser el mecanismo más importante para el envejecimiento de la fibra óptica, las moléculas de hidrógeno pueden difundirse en las fibras de silicio y producir cambios en la atenuación. Carecimiento de normativa internacional sobre algunos aspectos referentes a los parámetros de los componentes, calidad de la transmisión y pruebas. [4]

A diferencia de las conexiones cableadas, los problemas con las redes de transporte de datos inalámbricas a menudo requieren mayor habilidad y tiempo para diagnosticarlos y solucionarlos, son algo más inseguras, el ancho de banda es menor que las cableadas, son un poco más inestables, pueden verse afectada por otras ondas electromagnéticas o aparatos electrónicos cercano, la señal puede verse afectada e incluso interrumpida por objetos, árboles, paredes, etc. La interferencia, el viento y otras obstrucciones físicas pueden causar fallas en una red. [5] , [6]

1.3. Delimitación

1.3.1. Delimitación de contenidos.

- **Área Académica de la Carrera:** Comunicaciones.
- **Línea de Investigación:** Tecnologías de la información y comunicación.
- **Sub Línea de Investigación:** Protocolos de comunicación.

1.3.2. Delimitación espacial

El presente trabajo investigativo se lo llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería en Sistema, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato.

1.3.3. Delimitación temporal.

El presente proyecto de investigación se desarrolló en el Periodo marzo 2017 – febrero 2018 de acuerdo a lo establecido en el Reglamento de Graduación para Obtener el Título Terminal de Tercer Nivel de la Universidad Técnica de Ambato.

1.4. Justificación

Los constantes avances en tecnología de la información permiten que nuevos dispositivos sean creados y con ello el requisito indispensable la necesidad de estar conectado a una red de datos, cada vez más se orienta hacia el internet de las cosas, la transmisión de audio y video en vivo, televisión IP, toda esta tecnología supone un sin número de ventajas a la humanidad a la vez que satura las redes de transporte de datos actuales, obligando a desarrollar nuevos enlaces ya sea utilizando medios guiados a través del uso de cables a largas distancias o el espectro radioeléctrico, para lo cual es necesario evaluar los estándares y tecnologías vigentes, a fin de determinar la mejor alternativa que solucione en gran medida los requerimientos planteados.

La tecnología inalámbrica ha dado la posibilidad de prestar el servicio de transporte de datos hacia sectores lejanos y de difícil acceso, proporcionan características como la movilidad y la flexibilidad, que con las redes cableadas son complicadas de obtener convirtiéndolas en imprescindibles para entornos cambiantes o que requieran gran capacidad de adaptación. La ampliación de las capacidades es una necesidad generada por los nuevos hábitos de entretenimiento online y los nuevos estándares de dispositivos.

El elemento importante que ha impulsado el desarrollo del presente proyecto es la necesidad de identificar los avances en tecnologías de transporte de altos volúmenes de información dando énfasis al uso del estándar inalámbrico normado por la IEEE el cual compite frente al transporte de información por medio de fibra óptica. Los avances en tecnología hacen posible el transporte de grandes volúmenes de información por medio del uso del espectro electromagnético.

Existe la factibilidad técnica para la evaluación del estándar IEEE 802.11ac y los estándares de fibra óptica mediante el uso de software, permitiendo las simulaciones de los mismos. Es necesario actualmente poder simular el resultado que obtendrán al implementar la tecnología en una red de la vida real, esto permite evaluar que estándar se debe seleccionar en relación a términos como la velocidad, capacidad de transmisión, ancho de banda requerido, frecuencia de operación, así como de requerimientos propios de cada tecnología.

Los principales beneficiarios de dicha investigación son instituciones como Proveedores de Servicio de Internet (ISP), Gobiernos Autónomos, entre otras, que requieren de la implantación de nuevas tecnologías en sus redes de transporte, la investigación aporta con una guía informativa en la selección de la mejor alternativa para el diseño de nuevos enlaces, tomando en cuenta parámetros de funcionalidad, ventajas y desventajas, capacidad, medio ambiente, entre otros.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

- Evaluar el estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO en comparación al estándar de Fibra Óptica en Redes de transporte de datos por medio de simulación.

1.5.2. Específicos

- Analizar las características técnicas de los estándares de la Fibra Óptica.
- Determinar las características técnicas del estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO.
- Simular redes de transporte utilizando el estándar IEEE 802.11ac y estándares de Fibra Óptica.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Investigativos

Para el estudio de los estándares IEEE 802.11ac y los estándares de la fibra óptica se citan los documentos de investigación recopilados de los últimos 5 años, entre los trabajos de investigación relacionados se realiza un enfoque especialmente al estándar IEEE 802.11ac.

Luis Manuel Mancero Baldeon en la Escuela Politécnica del Ejército en el 2013 realizó el proyecto *“Simulador multiplataforma para redes GPON.”* Por medio del uso del software de código libre OpenSimMPLS ha realizado el análisis de la arquitectura de las redes PON a fin de poder representar su funcionamiento en el simulador y extrae como conclusión las ventajas que tiene el uso y la funcionalidad del software para la simulación de entornos de redes de datos utilizando equipos de Fibra Óptica. [7]

Fausto Fernando Alarcón Alarcón en el año 2016, en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito ha desarrollado el artículo: *“Análisis y simulación de un escenario de una red PON que usa un método de asignación dinámica de longitud de onda”* en el cual por medio del uso del software OptiSystem y componentes de Matlab emula routers ópticos, obtiene como resultados que con una longitud de onda se puede tener dos clases de servicio, uno con prioridad y otro sin prioridad, dependiendo de las peticiones de las unidades de redes ópticas al router óptico. [8]

Joseph Kampeas, Asaf Cohen y Omer Gurewitz miembros del Departamento de Comunicaciones de la Universidad de Negev en el año 2016, presentaron el artículo *“Rate Analysis of Distributed Multiuser MIMO Protocols for the 802.11ac”* en el cual se analizan dos algoritmos distribuidos de selección de usuario en la velocidad de

bajada utilizando MU-MIMO, en la cual utilizando demostraciones a través de simulaciones en base a programación común realizan una evaluación de las mejoras de rendimiento demostrando la superioridad de los métodos basados en umbrales simples. [9]

Danny Alejandro Ortiz Puga en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito realizó el proyecto “*Análisis comparativo del desempeño del estándar IEEE 802.11ac respecto al IEEE 802.11n a través de simulación numérica apoyada por software*” en el cual por medio del software OMNet++ después del análisis de los escenarios aplicando los estándares respectivos determina las velocidades reales de transmisión que podrían alcanzar llegando a la conclusión de que la norma 802.11ac debe alcanzar las velocidades máximas de 1,3Gbps en el caso ideal y que la simulación ha demostrado un velocidad máxima de 987,56 Mbps. [10]

Llangarí Arizo Felipe Andrés Mejía y Quishpe Enrique Javier en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2016 han desarrollado el proyecto “*Estudio, pruebas y simulación del estándar IEEE 802.11AC basándose en MU-MIMO (MIMO- Multiuser)*” en el mismo presentan una descripción detallada de los avances propuestos por el estándar IEEE 802.11ac en relación a sus predecesores y demuestran mediante la simulación de los mismos por medio del uso del software MATLAB analizando el modelamiento de canal y realizando múltiples pruebas en distintos escenarios con equipos físicos, obtenido como resultados que al aumentar el ancho de banda de canal la correlación entre las señales transmitidas será mayor, en la práctica determinan que los dispositivos deben tener las condiciones idóneas para poder enviar y recibir datos. [11]

B. Bellalta, J. Barcelo, D. Staehle, A. Vinel y M. Oliver, en el año 2012, presentaron el artículo: “*On the Performance of Packet Aggregation in IEEE 802.11ac MU-MIMO WLANs*” en el cual se realiza pruebas de rendimiento por medio del envío de paquetes utilizando la tecnología MU-MIMO en ambientes de laboratorio, obteniendo como resultado que en condiciones de no saturación en el número de estaciones activas, el tamaño de la cola de transmisión tiene un impacto significativo de rendimiento y que cuando las estaciones activas es excesivamente alto, se hace difícil sacar provecho de la agregación de paquetes, esto debido a la heterogeneidad de los paquetes. Además,

determinan que este efecto puede ser superado incrementando el tamaño de la cola, aumentando con ello las posibilidades de la programación de un gran número de paquetes en cada transmisión y mejorando el rendimiento del sistema. [12]

N. S. Ravindranath, I. Singh, A. Prasad y V. S. Rao, en el año 2017 por medio del artículo: "*Study of performance of transmit beamforming and MU-MIMO mechanisms in IEEE 802.11ac WLANs*" realizan el estudio de las características de la formación del haz y multiusuario MIMO (MU MIMO) en la transmisión, analizando los enfoques sugeridos para mejorar el rendimiento de 802.11ac, por medio de la información obtenida sirve para la comprensión de los mecanismos de transmisión centrandose su atención en la selección de los documentos que muestran la variedad de enfoques utilizados, determinando que la mayoría de las sugerencias que se realizan para la formación de haces, han sido en las áreas de agregación y de TXOP de la capa MAC y en la precodificación, rastreo y mecanismos de detección de la capa PHY. [13]

M. Abu-Tair y S. N. Bhatti, en el año 2017 por medio de su artículo "*IEEE 802.11ac MU-MIMO Wireless LAN Cells with Legacy Clients*", proporcionan una evaluación empírica de una celda de red de área local inalámbrica (WLAN) IEEE 802.11ac con tecnología de MU-MIMO. Llevando a cabo experimentos en un banco de pruebas para medir el rendimiento de la WLAN en el punto de acceso, con dos escenarios: una estación individual y una estación individual con tráfico de fondo emulando una celda ocupada. Encontrando que MU-MIMO es probable que rinda beneficios limitados y que los sistemas del cliente también se deben actualizar para aprovechar la capacidad de esta tecnología. [14]

J. Oh, J. Choi, M. Song y H. D. Choi, en el 2014 por medio del artículo "*Performance comparison of cooperative downlink transmission schemes in IEEE 802.11ac: Interference alignment vs. MU-MIMO with TDMA*", describen que la interferencia entre el conjunto de servicios básicos (BSS) está incrementado, debido a múltiples APs desplegados en situación no planificada y que para reducir la interferencia del BSS superpuesto (OBSS) de las redes IEEE 802.11ac que interfiere la red de radiodifusión, sugieren dos esquemas de transmisión cooperativa que son interferencia alineación

(IA) y multi-usuario multi-entrada y multi-salida (MU-MIMO) con acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). [15]

K. Kosek-Szott y G. Cuka, en el 2017 por medio del artículo "*Consequences of Performing DL MU-MIMO Transmissions with TXOP Sharing for QoS Provisioning in IEEE 802.11ac Network,*" Presentan un modelo matemático de 802.11ac DL MU-MIMO. Los resultados obtenidos muestran mayor flexibilidad del aprovisionamiento de QoS en redes 802.11ac en comparación a EDCA heredado. Es posible para ajustar flexiblemente el tiempo de intercambio de canales con el fin de cumplir los requisitos de diferentes servicios, permitiendo por ejemplo maximizar el rendimiento de una transmisión de video sin sacrificar la calidad de otras transmisiones. [16]

2.2. Redes de Transporte

Una red de telecomunicaciones está formada por los sistemas de transmisión/recepción y cuando proceda, los equipos de conmutación, demás recursos que permitan la transmisión/recepción de señales entre puntos de terminación definidos mediante cable o de otra índole. [17]

Las Redes de Transporte de datos son imprescindibles para que la comunicación fluya de un lugar a otro. Cada una de las tecnologías que intervienen en un sistema de comunicación tiene su función, la de este tipo de redes es llevar, físicamente, la información de un lugar a otro, normalmente de manera transparente, es decir, es igual transportar un paquete IP, o una trama Ethernet, solo recogen la información y la envían de un punto a otro. Para ello se utiliza fibra óptica principalmente, ya que es el portador que mayor ancho de banda permite. También se pueden utilizar cables de cobre o coaxial, pero están tendiendo a desaparecer, por la necesidad de mayor alcance y ancho de banda. Otra alternativa interesante en zonas aisladas o de difícil acceso es utilizar las conexiones radioeléctricas.

La arquitectura de este tipo de redes es diversa, y cada institución despliega las que más le conviene según el tipo de zona que requiere cubrir y según el tráfico que quiera transportar. Hasta ahora, han sido redes independientes y transparentes. La evolución de las redes hacia el concepto de Redes de Nueva Generación (NGN) está cambiando la visión y el papel de la red de transporte. Las nuevas soluciones pasarían por integrar

funcionalidades de transporte en los diferentes tipos de redes, o bien, implementar nuevas tecnologías que permitan transportar los paquetes de forma más eficiente. [18]

En la figura 1 se evidencia el esquema sobre la posición que ocupan las redes de transporte con relación a las redes de acceso, a los usuarios y a internet.

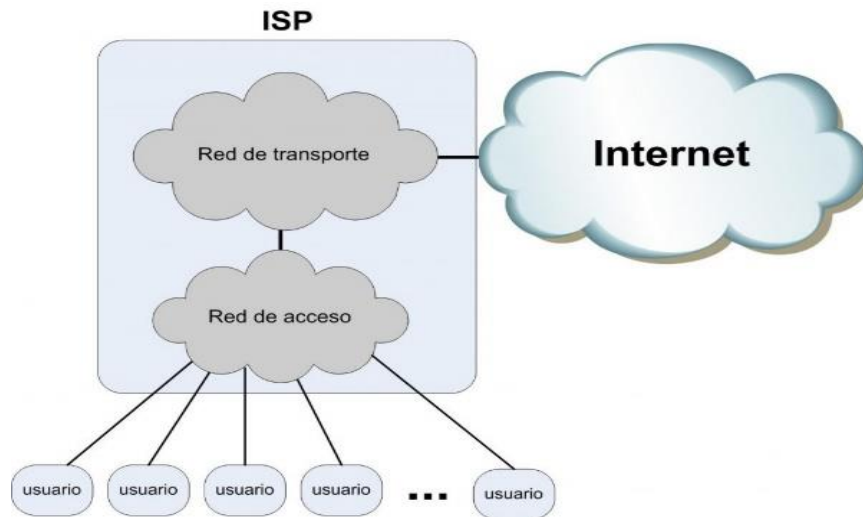


Figura 1 Tipos de redes de telecomunicaciones [19]

2.2.1. Medios de transmisión

Los medios de transmisión son el elemento por el que viajan los datos en las redes de telecomunicaciones. La función proporcionada por los medios de transmisión está incluida en el nivel físico del modelo OSI, conocer las características, propiedades y comportamiento de los medios de transmisión disponibles es fundamental para entender el funcionamiento de las redes de telecomunicaciones.

Medios Guiados

En los medios guiados los datos son transportados a través de un material que canaliza la señal que transporta. Cuando se conecta dos dispositivos mediante un cable, la información viaja de un dispositivo a otro canalizada en dicho cable. Existen dos tipos de señales que se pueden utilizar para transportar datos a través de un medio guiado, las señales eléctricas y las señales ópticas. El cobre es el material que se emplea para transportar señales eléctricas y la fibra óptica es el medio que se emplea para transportar señales ópticas.

Medios no guiados

En los medios no guiados los datos viajan en forma de ondas electromagnéticas utilizando el aire como medio de transmisión. En este caso, los datos se propagan sin estar sujetos a ninguna canalización que guíe la señal. También reciben el nombre de medios inalámbricos. Está muy extendido en las telecomunicaciones, ya que los principales servicios ofrecidos, como la televisión, radio o telefonía móvil usan medios inalámbricos. [20]

2.3. Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos; un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el núcleo de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un LED. Los hilos de fibra óptica son filamentos de vidrio (compuestos de cristales naturales) o plástico (cristales artificiales), del espesor de un pelo (entre 10 y 300 micrones). La fibra óptica se encargan de llevar mensajes en forma de haces de luz atravesando de un extremo a otro sin interrupción. [21]

Una Fibra Óptica consiste en dos regiones concéntricas. La región interna es un filamento transparente llamado núcleo, y su índice de refracción es superior a la región externa. La región exterior consiste de un revestimiento de cuarzo o plástico al igual que el núcleo. Cuando la luz inyectada en un extremo de la fibra se encuentra dentro de un determinado ángulo conocido como abertura numérica, esta es reflejada totalmente y continúa reflejándose múltiples veces a través de la fibra por esta reflexión interna total, hasta que sale por el otro extremo. El revestimiento se encuentra rodeado de una tercera capa, la cubierta protectora, de material plástico. [22]

En la figura 2 se evidencia una fibra óptica típica.

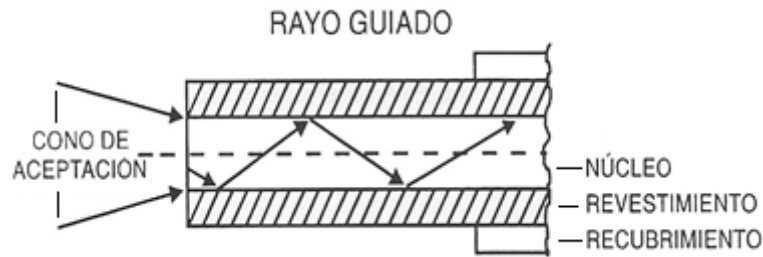


Figura 2 Fibra Óptica [22]

2.3.1. Ventajas de la Fibra Óptica

Presentan un conjunto importante de ventajas sobre otros soportes utilizados en la transmisión de señales analógicas y digitales:

- Elevado ancho de banda, lo que permite una gran capacidad de transmisión de información, que se traduce en un mayor rendimiento de los sistemas.
- Reducido valor de atenuación sobre las señales que se propagan a través del portador. Permite realizar enlaces de mayor longitud sin necesidad de repetidores. La atenuación depende del tipo de fibra óptica y de la longitud de onda (λ) utilizada.
- Las características de transmisión son muy poco alteradas por cambios en la temperatura, siendo innecesario y/o simplificada la eualización y compensación de las variaciones en tales propiedades (estable de -40° a 80°c).
- Las señales se pueden transmitir a través de zonas eléctricamente ruidosas con muy bajo índice de error y sin susceptibilidad alguna a la interferencia eléctrica.
- La diafonía no es problema debido a la no inducción de campos eléctricos y magnéticos.
- La intrusión en una fibra óptica es fácilmente detectable por el debilitamiento de la energía lumínica en recepción, además, no irradia nada, lo que es particularmente interesante para aplicaciones que requieren alto nivel de confidencialidad.
- No plantea peligros de descarga eléctricas ni de incendios. Ideal para aplicaciones en ambientes peligrosos (ambientes explosivos o inflamables) o en electro medicina, las fibras ópticas son imprescindibles debido a la imposibilidad de producir descargas o chispas.

- Su reducido tamaño y peso, y relativamente alta resistencia mecánica, los problemas de almacenamiento, transporte e instalación se ven disminuidos.
- Puede fabricarse cables muy livianos ya que el peso específico del vidrio es la cuarta parte la del cobre.
- La materia prima utilizada en la fabricación de fibra óptica, el dióxido de silicio (SiO_2), es uno de los recursos que más abundan en la superficie terrestre.
- Gran flexibilidad, el radio de curvatura puede ser inferior a 1 cm, lo que facilita la instalación.
- Insensibilidad a los parásitos, lo que es una propiedad principalmente utilizada en los medios industriales fuertemente perturbados (por ejemplo, en los túneles del metro). Esta propiedad también permite la coexistencia por los mismos conductos de cables ópticos no metálicos con los cables de energía eléctrica.
- Gran resistencia mecánica (resistencia a la tracción, lo que facilita la instalación).
- Resistencia a factores ambientales como calor, frío, corrosión.
- Facilidad para localizar los cortes gracias a un proceso basado en la telemetría, lo que permite detectar rápidamente el lugar y posterior reparación de la avería, simplificando la labor de mantenimiento.
- Con un coste menor respecto al cobre. [23], [24]

2.3.2. Desventajas de la Fibra Óptica

Inconvenientes que se presentan en los sistemas de transmisión por fibras ópticas:

- Necesidad de usar transmisores y receptores más caros.
- Las moléculas de hidrógeno pueden difundirse en las fibras de silicio y producir cambios en la atenuación. El agua corroe la superficie del vidrio y resulta ser el mecanismo más importante para el envejecimiento de la fibra óptica.
- La necesidad de efectuar, en muchos casos, procesos de conversión eléctrica-óptica. [23]
- Las radiaciones gamma hacen que los cables de fibra óptica emitan luz, lo que genera interferencia. Además, la radiación gamma decolora la fibra óptica, lo que genera atenuación de la señal.

- Desarrollo lento de los estándares de fabricación, puesto que no están aun claramente establecidos.
- Los campos eléctricos de voltajes muy altos pueden afectar al cable de fibra óptica de la misma forma que los rayos gamma. [25]
- Necesidad de un alto grado de precisión cuando se conectan cables y terminales o conectores.
- Necesidad de tener en cuenta la resistencia mecánica de las fibras y la necesidad de asegurar que las curvas que dan los cables tengan radios suficientemente grandes para minimizar las pérdidas o la posibilidad de daños a las fibras. [26]
- Los diminutos núcleos de los cables deben alinearse con extrema precisión al momento de empalmar, para evitar una excesiva pérdida de señal.
- El costo relativamente alto en comparación con los otros tipos de cable.
- La especialización del personal encargado de realizar las soldaduras y empalmes. [27]

2.3.3. Propagación de la fibra óptica.

A las ondas luminosas se les referencia por su longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia mediante la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

En donde:

λ : es la longitud de onda.

c : la velocidad de la luz.

f : es la frecuencia.

La luz es una forma de onda electromagnética y sus propiedades han de ser descritas a partir de las ecuaciones de Maxwell. Debido a que la longitud de las ondas electromagnéticas que se propagan (infrarrojo y visible) es muy pequeña, el estudio de la propagación en el interior de la fibra puede efectuarse con el modelo simplificado de rayos luminosos y leyes de la óptica geométrica. [22]

2.3.4. Ley de Snell, índice de refracción

Cuando la luz pasa de un medio a otro cambia de velocidad. Introduciéndose una deflexión en los rayos de luz denominada refracción. El término que define esta característica de un medio es el índice de refracción, el cual se define como la relación entre la velocidad de la onda luminosa en el vacío (c) y la velocidad de la onda luminosa propagada en el medio (v). Cuando la luz viaja en un medio denso, la velocidad de la luz (velocidad de propagación) disminuye pasando a ser v . Cuando se divide la velocidad de la luz en el vacío c , por la velocidad de la luz en un medio denso v , da el índice de refracción (n), se verifica en la ecuación:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

La ley de Snell afirma que cuando incide un rayo luminoso sobre una superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción n , el rayo que viaja por el medio más denso (índice de refracción más alto) es parcialmente reflejado y parcialmente refractado. Si el ángulo θ_1 aumenta, el ángulo θ_2 del rayo refractado también aumenta. Habrá un ángulo de incidencia que provocará θ_2 igual a 90° , produciéndose la reflexión total; esto es, toda la luz refleja hacia el medio más denso y no hay refracción hacia el medio menos denso.

La apertura numérica denota el ángulo máximo de incidencia, con el cual toda la luz incidente es propagada por el interior de la fibra sin que se produzca refracción, solo hay rayo reflejado. Es lo que se denomina el fenómeno de la reflexión total. Para un ángulo superior de incidencia se perderá la luz incidente por refracción. [22]

2.3.5. Tipos de fibra óptica

Dependiendo del tipo de propagación de la señal luminosa en el interior de la fibra, éstas se clasifican en los siguientes grupos:

- Multimodo
- Monomodo

Multimodo

La fibra óptica Multimodo es un tipo de fibra, que por su construcción (mayor diámetro del núcleo) permite el paso de más de un haz de luz de forma simultánea, y por tanto permite que varios “modos” de luz puedan entrar y salir de la fibra. Se basa en la reflexión contra sus paredes para la propagación de la luz.

Monomodo

La fibra óptica Monomodo es un tipo de fibra, que por su construcción (núcleo muy pequeño), solo permite el paso de un haz de luz, este haz de luz, no rebota en las paredes, y viaja paralelo a la longitud del cable. Por ese motivo, las pérdidas por reflexión (distorsión modal), son menores, y por tanto la fibra puede ser más larga que en las Multimodo.

Fibra OM1, OM2, OM3, OM4, OM5, OS1, OS2

Las Fibras de letras "OM" representan el modo múltiple óptico, es decir se aplica para la fibra óptica Multimodo, mientras que las Fibras de letras "OS" representan el modo simple óptico, es decir que se aplica a fibra óptica Monomodo. La numeración hace referencia al tipo de núcleo, Distancia máxima, Ventana de operación (longitud de onda y por tanto color de la luz) y Ancho de banda. A mayor número (OM1..OM3..OM5), mayor es la calidad del material y por tanto, mayor transparencia tiene y más lejos puede llegar la luz. [28]

En la tabla 1 y tabla 2 se resume el alcance de los tipos de fibra OM y su alcance con relación a las longitudes de onda soportados.

Tabla 1 Fibra OM1, OM2, OM3 [29]

Protocolo	MM 62,5/125 OM1		MM 50/125 OM2		MM 50/125 OM3	
	Longitud de Onda		Longitud de Onda		Longitud de Onda	
	850nm	1300nm	850nm	850nm	1300nm	1300nm
Fast Ethernet	300m	2000m	300m	2000m	300m	2000m
Gigabit E.	330m	550m	550m	550m	900m	550m
10 Gigabit	35m	300m	86m	300m	300m	300m
40 Gigabit	N/A	N/A	N/A	N/A	100m	N/A
100 Gigabit	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 2 Fibra OM4, OS2 [29]

Protocolo	MM 50/125 OM4		SM tipo OS2	
	Longitud de Onda		Longitud de Onda	
	1300nm	1300nm	1300nm	1550nm
Fast Ethernet	300m	2000m	2000m	N/A
Gigabit E.	1040m	550m	5000m	N/A
10 Gigabit	550m	300m	10Km	40K
40 Gigabit	125m	N/A	10Km	N/A
100 Gigabit	125m	N/A	40Km	N/A

2.3.6. Sistemas de Comunicaciones Ópticas Punto a Punto

Un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto está constituido fundamentalmente por un transmisor óptico, un canal de transmisión de fibra óptica y un receptor. Si el sistema es utilizado para comunicar puntos separados por grandes distancias, es necesario incluir repetidores de señal, dependiendo de las pérdidas en el canal a lo largo de la distancia de enlace. [30]

A partir de la instalación de los primeros sistemas de comunicaciones por fibra óptica, el objetivo en el desarrollo de estos sistemas ha sido el conseguir progresivamente una mayor capacidad, expresado por el producto B_L (producto velocidad del sistema por espaciado entre repetidores). En la evolución que han sufrido los sistemas de comunicaciones ópticas se puede hacer una clasificación histórica en generaciones, cada una de las cuales está caracterizada por una serie de parámetros.

2.3.7. Ventanas de Operación de la Fibra Óptica

Las Ventanas de Operación se refiere a la Longitud de Onda seleccionada para el enlace por fibra óptica. La transmisión de fibra óptica utiliza longitudes de onda que se encuentran en la parte del espectro cercana al infrarrojo, justo por encima de la visible y, por lo tanto, indetectable a simple vista. Las longitudes de onda de transmisión óptica típicas son 850 nm, 1310 nm y 1550 nm.

Hay gamas de longitudes de onda en las que la fibra funciona mejor. Cada rango se conoce como ventana de operación. Cada ventana se centra en la longitud de onda operativa típica. La relación entre las ventanas y la longitud de onda se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Ventanas de operación de la fibra óptica [31]

Ventana	Longitud de Onda	Longitud de onda operativa
Primera	800 – 900 nm	850 nm
Segunda	1250 – 1350 nm	1310 nm
Tercera	1500 – 1600 nm	1550 nm

Las pérdidas varían en función de la longitud de onda utilizada. Las pérdidas son mayores cuando menor es la longitud de onda respecto del tamaño de las impurezas de la fibra. Por lo tanto, las pérdidas son menores para longitudes de onda mayores. Las pérdidas por absorción tienen un mínimo sobre los 1550 nm, aumentando hacia la zona del ultravioleta y también hacia la zona del infrarrojo. Las pérdidas por imperfecciones de la guía (microcurvaturas producidas en el propio proceso de fabricación) son prácticamente constantes para cualquier longitud de onda. [31]

Amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio - EDFA

Los amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio (EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier) permiten amplificar la señal de información en el dominio óptico (amplifican fotones) sin necesidad de las conversiones optoelectrónicas. Permite que el dispositivo pueda discernir entre diferentes longitudes de onda y permitiese tratar de igual manera diferentes tasas binarias de la señal de información. Estos amplificadores trabajaban en la banda de 1550 nm con unas excelentes propiedades de alta ganancia (50dB), baja figura de ruido (3.1dB) y enorme ancho de banda (4600GHz).

El desarrollo de los EDFA posibilita el retomar la idea relativa a poder aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones ópticas mediante la multiplexación por longitud de onda. La tendencia actual de los sistemas de comunicaciones ópticas es conseguir transparencia óptica entre el origen y el destino de la señal intentando eliminar el cuello de botella que supone todo paso al dominio electrónico, siendo las principales limitaciones de estos sistemas: la dispersión cromática de la fibra monomodo estándar ya tendida, el limitado y no plano espectro de ganancia de los EDFA, los efectos relacionados con la polarización y los efectos no lineales que presentan las fibras ópticas cuando se trabajan con potencias de señal óptica elevadas como por ejemplo en los sistemas DWDM. [29]

2.3.8. Redes de Transporte en Fibra Óptica OTN

Las redes de transporte son un conjunto de elementos de red ópticos conectados mediante fibra óptica, están especificadas por la ITU-T en varias recomendaciones G.872 para la arquitectura, el G.709 para los formatos y tramas, G.798 para funciones y procesos. La jerarquía de estas redes está basada en el camino óptico, donde se ingresa la carga de datos a transportar. Estas redes encavarán las jerarquías de red que existen actualmente como SDH. La estructura de una red óptica se basa en tres planos:

- Plano de gestión: es el plano que está en contacto con el operador de la red, proporcionando los servicios necesarios para su gestión.
- Plano de control: se encarga de la supervisión, restauración y control de los equipos que están en el plano de transporte.
- Plano de transporte: por donde se establece la conmutación de los caminos ópticos. Contiene el hardware que hace posible transportar los datos entre sus extremos.

En una primera revisión el plano de control era único, pero en siguientes revisiones se ha convertido en distribuido. Entonces para que puedan comunicarse entre los distintos planos tanto verticalmente como horizontalmente existen unas interfaces: U-NNI, NMI, E-NNI. La concreción de las OTN's llevo al desarrollo de las ASON (Recomendación ITU-T G.8080). [32]

2.3.9. Multiplexación por división de longitud de Onda WDM

La Multiplexación por división de longitud de Onda es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un LED. Cada portadora óptica forma un canal óptico que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio (fibra óptica) y contener diferente tipo de tráfico. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales.

Dentro de la familia WDM existen dos sistemas, CWDM y DWDM que a su vez puede ser de ultra larga distancia, de larga distancia o metropolitano.

Multiplexación por división en longitudes de onda ligeras CWDM

La multiplexación por división en longitudes de onda ligeras o Coarse wavelength Division Multiplexing, es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica que pertenece a la familia de multiplexión por división de longitud de onda, se utilizó a principios de los años 80 para transportar señal de video (CATV) en conductores de fibra multimodo, fue estandarizado por la ITU-T, en la recomendación de la norma G.694.2 en el año 2002.

Se basa en una rejilla o separación de longitudes de onda de 20 nm (o 2.500 GHz) en el rango de 1.270 a 1.610 nm; pudiendo así transportar hasta 18 longitudes de onda en una única fibra óptica monomodo.

Características de CWDM

- Posee espaciamiento de frecuencias de 2.500 GHz (20nm), dando cabida a láseres de gran anchura espectral.
- 18 longitudes de onda, definidas en el intervalo de 1270 a 1610 nm.
- Los CWDM actuales tienen su límite en 2,5 Gbps.
- En cuanto a las distancias que cubren llegan hasta unos 80 km.
- Utilizan láser DBF (láseres de realimentación distribuidos) sin peltier ni termistor.
- Usa filtros ópticos de banda ancha, multiplexores y demultiplexores basados en TFF (tecnología de película delgada)
- Mayor espaciamiento de longitudes de onda, lo que indica que si hay una variación en la onda central debido a imperfecciones de los láseres producidos por procesos de fabricación menos críticos esta onda se mantendrá en banda.
- Mayor espectro óptico, esto nos permite tener un número de canales para utilizar sin que estos sean disminuidos a causa de la separación entre ellos.

Ventajas

- Menor consumo energético.
- Tamaño inferior de los láser CWDM.
- Soluciona los problemas de cuellos de botella.

- Hardware y costo operativo más barato referente a otras tecnologías de la misma familia.
- Anchos de banda más elevada.
- Es más sencillo referente al diseño de la red, implementación y operación.
- Mayor facilidad de instalación, configuración y mantenimiento de la red.
- Alto grado de flexibilidad y seguridad en la creación de redes ópticas metropolitanas.
- Puede transportar cualquier servicio de corto alcance como: SDH, CATV, ATM, FTTH – PON, 10Gibagit, entre otros.

Multiplexación por división en longitudes de onda densas DWDM.

La multiplexación por división en longitudes de onda densas o Dense wavelength Division Multiplexing, es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1550 nm). Varias señales portadoras (ópticas) se transmiten por una única fibra óptica utilizando distintas longitudes de onda de un haz láser cada una de ellas. Se trata de una técnica de transmisión muy atractiva para las operadoras de telecomunicaciones ya que les permite aumentar su capacidad sin tender más cables ni abrir zanjas.

Para transmitir mediante DWDM es necesario dos dispositivos complementarios: un multiplexor en lado transmisor y un demultiplexor en el lado receptor. A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue mayores números de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM "Dispersion Compensation Modules". De esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre sí 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz respectivamente. [33]

La técnica de DWDM que especifica 40 canales dentro de cada una de las bandas, generando un total de 80 señales diferentes que se pueden transmitir por la fibra. La siguiente figura muestra un esquema que permite comparar los canales disponibles en CWDM con los de DWDM.

Tanto en CWDM como en DWDM, es notable la criticidad de la señal óptica que se inyecta en la fibra. Para este propósito se utilizar un equipo llamado TRANSPONDER cuya función es la adecuación de la señal del equipo de transmisión (multiplexor, switch, etc.) para convertirla al rango de longitudes de onda que coincida exactamente con el canal a transmitir sin interferir con los demás.

Por otro lado, también será necesario el uso de un equipo multiplexor que será capaz de sumar los haces de todos los transponders e inyectar la salida directamente en la fibra óptica. [34]

DWDM es el gran ganador como arquitectura de transporte en las redes troncales. Resuelve el problema del agotamiento de las fibras en redes ópticas en un área metropolitana, su valor en este mercado va aún más allá. DWDM aporta la posibilidad de incrementar la capacidad de una fibra simplemente sintonizando una nueva lamda en la fibra existente. [32]

2.3.10. Propiedades de transmisión de la fibra óptica

Las principales características de transmisión de las fibras ópticas son la atenuación, el ancho de banda, el diámetro de campo modal y la longitud de onda de corte.

Atenuación

La atenuación significa la disminución de potencia de la señal óptica, en proporción inversa a la longitud de fibra. La unidad utilizada para medir la atenuación en una fibra óptica se expresa en dB/Km. Los factores que influyen en la atenuación se pueden agrupar en dos:

Factores propios. - Podemos destacar fundamentalmente dos.

- Las pérdidas por absorción del material de la fibra, ya que absorben la luz y la convierten en calor.
- Las pérdidas por dispersión (esparcimiento) se manifiesta como reflexiones del material, debido a las irregularidades submicroscópicas ocasionadas durante el proceso de fabricación y cuando un rayo de luz se está propagando choca contra estas impurezas y se dispersa y refleja.

Factores externos. - El principal factor que afecta son las deformaciones mecánicas. Dentro de estas las más importantes son las curvaturas, esto conduce a la pérdida de luz porque algunos rayos no sufren la reflexión total y se escapan del núcleo.

Ancho de Banda

El ancho de banda determina la capacidad de transmisión de información, considerando pulsos luminosos muy estrechos y separados en el tiempo. La capacidad viene limitada por una distorsión de la señal que resulta por ensanchamiento de los pulsos luminosos al transmitirse a lo largo de la fibra

Diámetro de campo modal

El Diámetro de campo modal se define como el tamaño espacial del modo fundamental a la salida de la fibra. Su valor aumenta conforme la longitud de onda de la luz guiada es mayor, es de gran importancia en las características de la fibra Monomodo. A partir de él se puede calcular posibles pérdidas en empalmes, pérdidas por microcurvaturas y dispersión cromática de la fibra.

Longitud de onda de corte

La longitud de onda de corte se define como la longitud en la que se produce la separación entre monomodo y multimodo. La fibra óptica, llamada monomodo no guía un único rayo para todas las longitudes de onda. Solo a partir de una longitud de onda óptica se comporta como monomodo, para longitudes de onda por debajo de ese valor la fibra óptica guía varios rayos de luz y se comporta como multimodo. [35]

2.3.11. Estándares de las Fibras Ópticas

Los estándares de fibra solo son recomendaciones ya que son ampliamente mejoradas por los actuales fabricantes de fibra óptica. Las recomendaciones describen los atributos geométricos, mecánicos y de transmisión de una fibra óptica monomodo.

UIT-T G-651

UIT-T G-651 es la recomendación para Fibras Ópticas Monomodo. Pueden Transmitir un solo Rayo. Poseen un gran ancho de banda, limitado por la dispersión cromática. El tamaño del núcleo de 7 a 11 micrometros.

UIT-T G-652

UIT-T G-652 es la recomendación de dispersión no desplazada Monomodo. Región de 1310nm de longitud de onda. También puede ser utilizado en la región de 1550nm. Presenta cero de dispersión. Su limitante es la dispersión cromática que afecta la región donde opera la CWDM. Adecuada para multiplexión para división de longitud de onda gruesa. Es adaptable a las redes dorsales, corrigiendo la dispersión cromática por equipos de transmisión DWDM. Fibra de dispersión desplazada no nula.

UIT-T G-655

UIT-T G-655 es la recomendación para fibra óptica Monomodo. Optimizada para operar en la banda de 1550nm moviendo la longitud de onda de dispersión cero fuera de la ventana de operación de 1550nm. El efecto práctico de esto es tener una cantidad pequeña pero finita de dispersión cromática en 1550nm. Permite la operación de equipos sin necesidad de emplear dispositivos compensadores de dispersión.

UIT-T G-657

UIT-T G-657 está diseñada para redes de acceso Monomodo. Introduce dos categorías de fibras monomodo G-657 A y B La categoría A es compatible con las fibras monomodo UIT-T G-652 Categoría B. No es necesariamente compatible con UIT-T G-652, pero es capaz de tener bajos valores de pérdidas. Predominantemente para uso en las redes de acceso. Adecuado para ser utilizado en los 850nm o 1300nm región. Es la fibra más utilizada en despliegues de FTTH (FTTx).

UIT-T G-651

UIT-T G-651 es la recomendación para fibras óptica Multimodo UIT-T G-651.1 alternativamente puede ser utilizado en regiones de longitud de onda simultánea. Apoyan la aplicación basada en Ethernet en sistemas con velocidades de transmisión que van hasta 1 Gbit/s, ya sea en los 850 nm o 1300 nm en las longitudes de onda de ventana. Para el 1 Gbit/s la longitud del enlace es de 550 m tanto a 850 nm. [36]

2.4. Redes de Transporte Inalámbricas

Las Redes de Transporte Inalámbricas resuelven principalmente la necesidad de conectividad punto a punto para extender redes de datos, control, automatización, voz

y video con una alta calidad a largas distancias y con un elevado ancho de banda. Estas redes pueden otorgar conectividad permanente a zonas alejadas o de difícil acceso, proporcionando un sinnúmero de soluciones. Además, proporcionan una reducción de costos relativos a cableado y al consumo energético si se utilizan paneles solares. [37]

2.4.1. Ventajas de las Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas poseen una serie de ventajas, entre las cuales se pueden destacar:

- **Movilidad:** Permiten el desplazamiento a los usuarios de una LAN acceso a la información en tiempo real en cualquier lugar.
- **Fácil Manejo e instalación:** Puede ser tan rápida y fácil y además que puede eliminar la posibilidad de tirar cable a través de paredes, pisos y techos.
- **Flexibilidad:** Permite a la red ir donde la alámbrica no puede ir.
- **Costo de propiedad reducido:** Mientras que la inversión inicial requerida para una red inalámbrica puede ser más alta que el costo en hardware de una LAN alámbrica, la inversión de toda la instalación puede ser significativamente inferior. Los beneficios y costos a largo plazo son superiores en ambientes dinámicos que requieren acciones y movimientos frecuentes.
- **Escalabilidad:** Los sistemas pueden ser configurados en una variedad de topologías para satisfacer las necesidades de las instalaciones y aplicaciones específicas.
- **Comodidad:** Cualquiera que tenga acceso a la red puede conectarse desde distintos puntos dentro de un espacio.
- **Compatibilidad entre dispositivos:** Los dispositivos al ser estandarizados por la IEEE lo cual permite la implementación en cualquier parte del mundo, teniendo una compatibilidad absoluta.
- **No existen cables físicos:** por lo tanto, no hay cables que se enreden, que entorpezcan el tránsito o que molesten estéticamente.
- **Permiten gran alcance:** Permite la posibilidad de conectar nodos a grandes distancias de la base transmisora sin cableado, en el caso de las redes inalámbricas corporativas.

- **Comunicación en áreas geográficas de difícil acceso:** Permite crear una red en áreas complicadas donde, por ejemplo, resulta difícil o muy cara conectar cables.

2.4.2. Desventajas de las Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas presentan los problemas intrínsecos de cualquiera tecnología inalámbrica. Algunos de ellos son:

- **Velocidad:** Presentan una menor velocidad en comparación a una conexión cableada, debido a pérdidas de señal que el ambiente puede acarrear.
- **Interferencia:** Debido al rango de frecuencia en el que trabajan en el rango inalámbrico, están muy propensas a las interferencias de señales.
- **Seguridad:** Debido a la forma en que fueron creadas presenta mayor vulnerabilidad en relación a los medios cableados ya que existen algunos programas capaces de capturar paquetes, de forma que puedan calcular la contraseña de la red y de esta forma acceder a ella.
- **Menor ancho de banda:** En comparación con las cableadas, la velocidad alcanzada por las redes cableadas es mayor.
- **Factores ambientales:** La potencia de transmisión se verá afectada por los agentes físicos, tales como: árboles, paredes, arroyos, una montaña, entre otros.
- **Poco Estables:** Son un poco más inestables que las redes cableadas, pueden verse afectada por otras ondas electromagnéticas o aparatos electrónicos cercanos. [38], [39]

2.4.3. IEEE 802 LAN/MAN

IEEE 802 es una familia de estándares referentes a redes de área local (LAN) y metropolitanas (MAN). Por definición los estándares IEEE 802 se restringen a redes que transportan paquetes de tamaño variable (en contraste con las redes basadas en celdas de tamaño uniforme como ATM “Asynchronous Transfer Mode”).

La familia de estándares IEEE 802 es mantenida por el comité de estándares LAN/MAN (LMSC) del IEEE que establece un grupo de trabajo individual para cada una de las 22 áreas que incluye. El IEEE802.11 (LAN inalámbricas) y el IEEE 802.16 (Acceso Inalámbrico de Banda Ancha) son dos de esas áreas.

2.4.4. Diferencia de nombres de IEEE802.11 y WiFi

Wi-Fi es una “marca” que es licenciada por la alianza Wi-Fi para los productos que cumplen los requerimientos para la interoperabilidad entre productos basados en el estándar IEEE 802.11, es decir que Wi-Fi esta es una aplicación más dentro de una gama de aplicaciones que se pueden implementar utilizando el estándar IEEE802.11. El estándar como tal determina las características de operación que tendrá la tecnología inalámbrica para operar con la finalidad de crear una compatibilidad entre dispositivos del mismo tipo [40]

2.4.5. Enmiendas 802.11

Las enmiendas contemplan principalmente las técnicas de modulación, gama de frecuencia y la calidad del servicio (QoS). Como todos los estándares 802 del IEEE, el IEEE 802.11 cubre las primeras dos capas del modelo de OSI (Open Systems Interconnection), es decir la capa física (L1) y la capa de enlace (L2).

La velocidad de transmisión para el estándar IEEE 802.11 original es de 2 Mbps utilizando el esquema de transmisión FHSS y la banda de frecuencia ISM que opera en el rango de frecuencia de 2,4 GHz a 2,5 GHz. Sin embargo, bajo condiciones menos ideales, se utiliza una velocidad de transmisión menor, de 1 Mbps.

802.11b

El estándar IEEE 802.11b presenta la estandarización de la capa física para soportar velocidades de transmisión más altas y admite dos velocidades adicionales, 5.5 Mbps y 11 Mbps, utilizando la banda de frecuencia de 2,4 GHz. Se utiliza el esquema de transmisión DSSS con el fin de proporcionar velocidades de transmisión más altas. La velocidad de 11 Mbps es alcanzable bajo condiciones ideales. Si no se cumplen las condiciones ideales, se utilizan las velocidades más lentas de 5,5 Mbps, 2 Mbps y 1 Mbps. Es importante señalar que 802.11b utiliza la misma banda de frecuencia que utilizan los hornos de microondas, teléfonos inalámbricos, monitores de bebés, cámaras de vídeo inalámbricas y los dispositivos Bluetooth.

802.11a

El estándar IEEE 802.11a puede operar a una velocidad de hasta 54 Mbps y utiliza la banda de frecuencia de 5 GHz. En lugar de DSSS, este estándar utiliza OFDM, lo que permite que los datos sean transmitidos por subportadoras en paralelo, proporcionando una mayor resistencia a las interferencias y una mayor velocidad de transmisión. Esta tecnología, con mayor velocidad, permite a la red inalámbrica un mejor comportamiento en aplicaciones de vídeo y conferencia.

Al no utilizar las mismas frecuencias que otros dispositivos (como teléfonos inalámbricos que funcionan en la banda de frecuencia de 2,4 GHz), OFDM y IEEE 802.11a proporcionan una mayor velocidad de transferencia y una señal más limpia, con muchas menos interferencias. La velocidad de bits de 54 Mbps es alcanzable bajo condiciones ideales. Si no se cumplen las condiciones ideales, se utilizan las velocidades más lentas de 48 Mbps, 36 Mbps, 24 Mbps, 18 Mbps, 12 Mbps y 6 Mbps.

802.11g

El estándar IEEE 802.11g puede operar a una velocidad de hasta 54 Mbps, pero utiliza la banda de frecuencia de 2,4 GHz y OFDM. 802.11g también es compatible con 802.11b, y puede operar a las velocidades de bits 802.11b y utilizar DSSS. Adaptadores de red inalámbrica 802.11g pueden conectarse a un punto de acceso inalámbrico 802.11b, y adaptadores de red inalámbrica 802.11b pueden conectarse a un punto de acceso inalámbrico 802.11g. Por lo tanto, 802.11g proporciona una ruta de migración para redes 802.11b a una tecnología estándar compatible en frecuencia, pero con una velocidad de transmisión más alta. Los adaptadores existentes de red inalámbrica 802.11b no se pueden actualizar a 802.11g mediante una actualización del firmware del adaptador, deben ser reemplazados. A diferencia de la migración de 802.11b a 802.11a (en la que todos los adaptadores de red, tanto en los clientes inalámbricos como en los puntos de acceso inalámbricos deben ser reemplazados al mismo tiempo), la migración de 802.11b a 802.11g se puede hacer de forma incremental.

Al igual que 802.11a, 802.11g utiliza 54 Mbps en condiciones ideales y las velocidades más lentas de 48 Mbps, 36 Mbps, 24 Mbps, 18 Mbps, 12 Mbps y 6 Mbps en condiciones menos ideales.

802.11n

El estándar IEEE 802.11n tiene como objetivo mejorar la distancia (hasta 250 m) y la velocidad de transmisión de las dos normas anteriores, 802.11a y 802.11g, con un aumento significativo de la velocidad máxima de datos en bruto de 54 Mbps a 600 Mbps en condiciones ideales añadiendo la tecnología de múltiple entrada múltiple salida y canales de 40 MHz, de mayor ancho de banda. Esta tecnología, denominada MIMO (Multiple Input Multiple Output), utiliza múltiples señales inalámbricas y antenas en el transmisor y el receptor. El estándar puede funcionar en las bandas de frecuencia de 2,4 GHz o 5 GHz.

802.11ac

El estándar 802.11ac, una actualización de 802.11n, ofrece un alcance similar, pero aumenta la velocidad de transmisión. Funciona en la banda de 5 GHz e incorpora la tecnología de formación de haz, banda ancha y múltiples antenas para ofrecer velocidades de datos teóricas de hasta 1,3 Gbps, más del doble que las tasas de pico de 600 Mbps alcanzadas con el estándar 802.11n. [41]

La tabla 4 resume las frecuencias y velocidad con relación al estándar empleado.

Tabla 4 Parámetros Estándar 802.11 [41]

Estándar	Banda de frecuencia	Máxima Velocidad Transmisión
IEEE 802.11	2.4 / 5 GHz	1 Mbps
IEEE 802.11 ^a	5 GHz	48 Mbps
IEEE 802.11b	2.4 GHz	11 Mbps
IEEE 802.11g	2.4 GHz	54 Mbps
IEEE 802.11n	2.4 / 5 GHz	600 Mbps
IEEE 802.11ac	5 GHz	1.3 Gbps

2.4.6. Aspectos técnicos IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 es un conjunto especificaciones de control de acceso al medio (MAC) y de la capa física (PHY) para la implementación de redes inalámbricas de área local en las bandas de frecuencias 2,4 GHz, 5 GHz, y 60 GHz.

La versión base del estándar fue lanzado en 1997, y ha tenido modificaciones posteriores. El comité del estándar IEEE 802 define dos capas separadas para la capa

de enlace de datos del modelo de referencia OSI, la subcapa de control de enlace lógico (Logical Link Control - LLC) y la subcapa de control de acceso al medio (Media Access Control - MAC). El estándar IEEE 802.11 define las especificaciones para la capa física y la capa de control de acceso al medio que se comunica por arriba con la capa de control de enlace lógico.

La figura 3 muestra la aplicación del estándar IEEE802.11 en las capas 1 y 2 del modelo de referencia OSI.

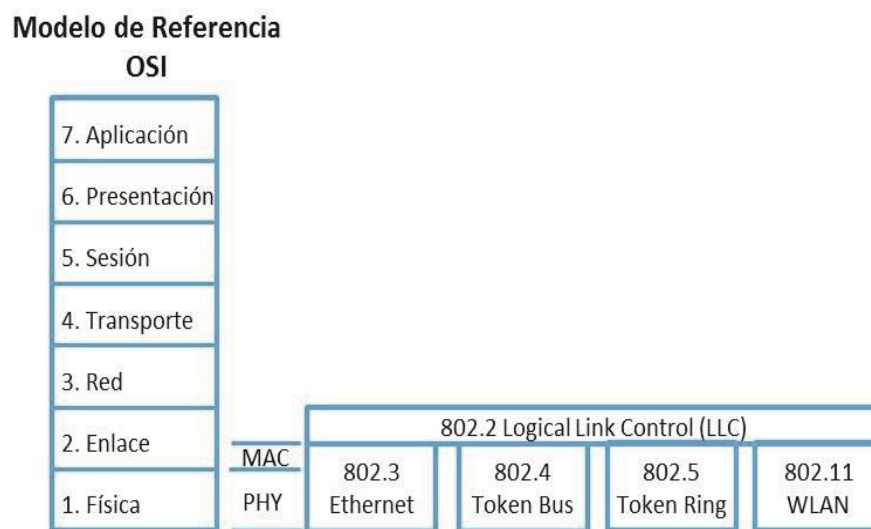


Figura 3 El estándar IEEE 802.11 y el modelo de referencia OSI [41]

Todos los componentes de la arquitectura 802.11 pertenecen a cualquiera de las dos capas, la subcapa de control de acceso al medio de la capa de enlace de datos o bien de la capa física (Physical - PHY).

Trama MAC 802.11

Una trama es una serie sucesiva de bits, organizados en forma cíclica, que transportan información y que permiten extraer esta información en la recepción. La trama MAC del estándar IEEE 802.11 consta de una cabecera MAC, un cuerpo de la trama y una secuencia de verificación de la trama (FCS). El formato de la trama MAC comprende un conjunto de nueve campos que se producen en un orden fijo en todas las tramas.

Campo Control de Trama

El Campo de Control de Trama contiene información de control utilizada para definir el tipo de trama MAC 802.11 y proporcionar la información necesaria a los siguientes campos para entender cómo procesar la trama MAC.

Una descripción de cada subcampo del campo de control de trama es:

- **Protocol Version** proporciona la versión actual del protocolo 802.11 utilizado. Las estaciones receptoras utilizan este valor para determinar si es soportada la versión del protocolo de la trama recibida.
- **Type and Subtype** determina la función de la trama. Hay tres tipos de tramas diferentes: de control, de datos y de gestión. Existen varios subtipos para cada tipo de trama. Cada subtipo determina la función específica que debe llevar a cabo el tipo de trama asociada.
- **To DS and From DS** indica si la trama se dirige o sale del DS (sistema de distribución), y sólo se utiliza en las tramas de tipo de datos de las STA asociadas con un AP.
- **More Fragments** indica si hay más fragmentos de la trama, ya sea de tipo datos o de gestión.
- **Retry** indica si la trama está siendo retransmitida, ya sea de tipo datos o de gestión.
- **Power Management** indica si la STA que envía está en modo activo o en el modo de ahorro de energía.
- **More Data** indica a un STA que se encuentra en el modo de ahorro de energía que el AP tiene más tramas para enviar. También se utiliza en los APs para indicar que existen tramas adicionales de difusión/multidifusión.
- **WEP** indica si se utilizan cifrado y autenticación en trama. Se puede configurar para todas las tramas de datos y de gestión que tienen el subtipo establecido en autenticación.
- **Order** indica que todas las tramas de datos recibidas deben ser procesadas en orden.

Campo Duración/ID

El Campo Duración/ID es utilizado en todas las tramas de tipo control, excepto en las del subtipo Power Save (PS) Poll, para indicar la duración restante necesaria hasta recibir la próxima transmisión de trama. Cuando se trata del subtipo PS Poll, el campo contiene la identidad de asociación (AID) de la STA que transmite la trama.

Campos de Dirección

Los campos de dirección dependiendo del tipo de trama, contendrán una combinación de los siguientes tipos de dirección:

- **BSS Identifier (BSSID)** identifica unívocamente a cada BSS. Cuando la trama es de una STA en una infraestructura BSS, el BSSID es la dirección MAC del AP. Cuando la trama es de una STA perteneciente a una IBSS, el BSSID es una dirección MAC administrada localmente generada aleatoriamente por la STA que inició la IBSS.
- **Destination Address (DA)** indica la dirección MAC del destino final que debe recibir la trama.
- **Source Address (SA)** indica la dirección MAC de la fuente original que inicialmente creó y transmitió la trama.
- **Receiver Address (RA)** indica la dirección MAC de la próxima STA que debe recibir la trama.
- **Transmitter Address (TA)** indica la dirección MAC de la STA que transmitió la trama.

Control de Secuencia

El Control de Secuencia indica un parámetro de la trama y está formado por dos subcampos, el número de fragmento y el número de secuencia.

A continuación, se describe cada uno de los subcampos anteriores:

- **Sequence Number** indica el número de secuencia de cada trama. El número de secuencia es el mismo para cada trama enviada en una trama fragmentada; de lo contrario, el número de secuencia se incrementa en uno hasta llegar a 4095, volviéndose a empezar desde cero.

- **Fragment Number** indica el número de fragmento en una trama fragmentada. El valor inicial se establece en 0 y luego se incrementa en uno para cada uno de los fragmentos de trama enviados.

Cuerpo de la Trama

El cuerpo trama contiene los datos o la información incluida en cualquier trama del tipo de gestión o de datos.

Secuencia de Verificación de Trama

La STA transmisora utiliza una verificación de redundancia cíclica (cyclic redundancy check - CRC) sobre todos los campos de la cabecera MAC y el cuerpo de la trama para generar el valor de FCS. La STA receptora utiliza el mismo cálculo de CRC para determinar su propio valor del campo FCS y verificar si se produjeron errores en la trama durante la transmisión.

La figura 4 detalla los campos de control de trama y de control de secuencia.

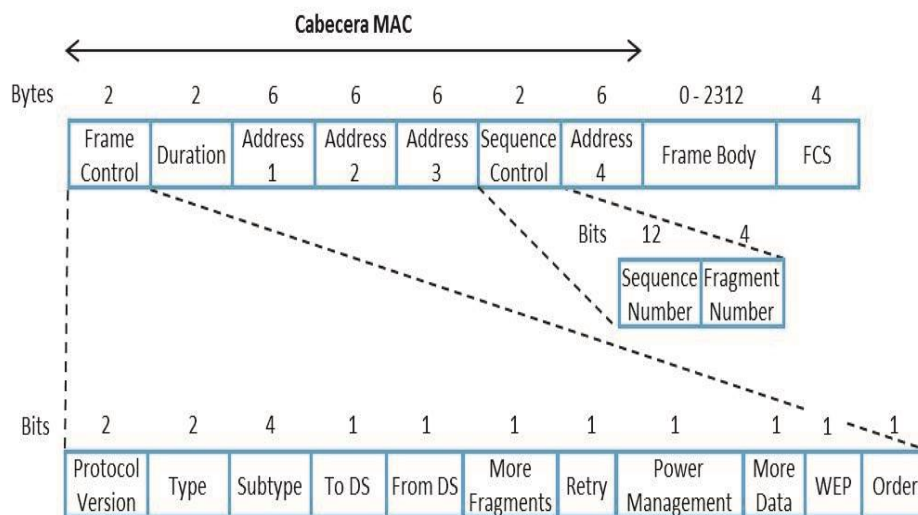


Figura 4 Formato de trama MAC en el estándar 802.11. [41]

Capa Física PHY

En la capa física (PHY), el estándar IEEE 802.11 define una serie de esquemas de codificación y transmisión para las comunicaciones inalámbricas, los esquemas de transmisión más comunes son Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia

(Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS), Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) y Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) . [41]

2.4.7. Técnicas de modulación

Modular una señal consiste en modificar alguna de las características de esa señal, llamada portadora, de acuerdo con las características de otra señal llamada moduladora. El término modulación es el conjunto de técnicas utilizadas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos. [42]

A medida que los datos se codifican más eficientemente, se logran tasas o flujos de bits mayores dentro del mismo ancho de banda, pero se requiere hardware más sofisticado para manejar la modulación y la demodulación de los datos. La idea básica detrás de las diversas técnicas de modulación usadas en IEEE 802.11 es utilizar más ancho de banda del mínimo necesario para mandar un “bit” a fin de conseguir protección contra la interferencia.

Espectro esparcido por salto de frecuencia FHSS

Frequency Hopping Spread Spectrum. Se basa en el concepto de transmitir sobre una frecuencia por un tiempo determinado, después aleatoriamente saltar a otra. La frecuencia portadora cambia durante el tiempo o el transmisor cambia periódicamente la frecuencia según una secuencia preestablecida.

El transmisor envía al receptor señales de sincronización que contienen la secuencia y la duración de los saltos. En el estándar IEEE 802.11 se utiliza la banda de frecuencia (ISM) que va de los 2,400 hasta los 2,4835 GHz, la cual es dividida en 79 canales de 1 MHz y el salto se hace cada 300 a 400 ms. Los saltos se hacen alrededor de una frecuencia central que corresponde a uno de los 14 canales definidos.

Espectro esparcido por secuencia directa DSSS

Direct Sequence Spread Spectrum. - Implica que, para cada bit de datos, una secuencia de bits llamada secuencia pseudoaleatoria, (identificada en inglés como PN) debe ser transmitida. Cada bit correspondiente a un “1” es substituido por una secuencia de bits específica y el bit igual a “0” es substituido por su complemento. El estándar de la capa física 802.11 define una secuencia de 11 bits (10110111000) para representar un “1” y su complemento (01001000111) para representar un “0”. En DSSS, en lugar de esparcir los datos en diferentes frecuencias, cada bit se codifica en una secuencia de impulsos más cortos, llamados chips, de manera que los 11 chips en que se ha dividido cada bit original ocupan el mismo intervalo de tiempo.

Multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing. A veces llamada modulación multitono discreta (DMT) es una técnica basada en la idea de la Multiplexación de división de frecuencia (FDM), que se utiliza en radio y TV, se basa en el concepto de enviar múltiples señales simultáneamente, pero en diversas frecuencias.

En OFDM, un sólo transmisor transmite en muchas (de docenas a millares) frecuencias ortogonales. El término ortogonal se refiere al establecimiento de una relación de fase específica entre las diferentes frecuencias para minimizar la interferencia entre ellas.

Una señal OFDM es la suma de un número de subportadoras ortogonales, donde cada subportadora se modula independientemente usando QAM (modulación de fase y amplitud) o PSK (modulación de fase).

Método de acceso al medio

En redes inalámbricas que utilizan la misma frecuencia para transmitir y recibir, es imposible detectar las colisiones en el medio, por lo que el mecanismo de compartición del medio se modifica tratando de limitar las colisiones y usando acuse de recibo (ACK) para indicar la recepción exitosa de una trama. Si el transmisor no recibe el ACK dentro de un tiempo preestablecido, supone que la transmisión no fue exitosa y la reenvía. Este protocolo se conoce como CSMA/CA, donde CA se refiere a “Collision Avoidance”, es decir, tratar de evitar las colisiones. Este método no es tan eficiente como el CSMA/CD porque hay que esperar el ACK antes de poder continuar utilizando el canal, y el mismo ACK consume tiempo de transmisión.

Además, para transmisión a grandes distancias el tiempo de espera por el ACK puede ser significativo debido a que las ondas de radio tardan 2 ms en ir y volver a una distancia de 300 km. Esencialmente, CSMA/CA utiliza unos tiempos de espera obligatorios de longitud variable entre tramas sucesivas para evitar las colisiones. Estos tiempos se denominan espaciado entre tramas, “Interframe Spacing”, y su valor depende del estado previo del canal. Opcionalmente también se pueden utilizar mecanismos de reserva del canal, en una técnica conocida como RTS/CTS (Ready to Send/Clear to Send) que garantiza el acceso al medio a expensas de tiempos de transmisión aún más largos.

El acceso al medio es controlado por el uso de diversos tipos de interframe spaces (IFS) o espacio entre tramas, que corresponde a los intervalos de tiempo que una estación necesita esperar antes de enviar datos. Los datos prioritarios como paquetes de ACKs o de RTS/CTS esperarán un período más corto (SIFS) que el tráfico normal. [40]

2.5. Tecnología MIMO

MIMO, acrónimo en inglés de Multiple-Input Multiple-Output (Múltiple entrada, Múltiple salida) surge como la tecnología que permite resolver los problemas relacionadas a la tasa de transferencia de las WLANs, ofreciendo mayores tasas de transferencia, mayores distancias de cobertura, mayor capacidad de usuarios y más fiabilidad; y todo ello sin aumentar el ancho de banda, y la potencia transmitida.

Es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, y que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico. Esto lo consigue a través del uso de diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace: extremo transmisor (múltiple entrada) y extremo receptor (múltiple salida).

Antes del desarrollo, los sistemas de comunicaciones inalámbricos veían en la propagación multicamino un gran inconveniente que debía de ser solventado, pero MIMO es la primera tecnología que trata el multicamino como una característica inherente al sistema que hay que aprovechar para poder multiplicar su capacidad. Esto permitirá incrementar extraordinariamente la velocidad, el caudal efectivo, el rango, la capacidad y la fiabilidad del sistema y todo esto sin un incremento del ancho de banda o de la potencia transmitida.

Diversidad como antecedente de MIMO

La diversidad es determinada cuando se tiene múltiples copias de la señal transmitida, y según dónde se produzca esta diversidad, existen las siguientes clases:

- Diversidad en el tiempo, cuando se transmite varias versiones de la misma señal en instantes diferentes.
- Diversidad en la frecuencia, cuando la señal es transmitida usando distintos canales de frecuencia. Un ejemplo sería OFDM o las técnicas de espectro expandido.
- Diversidad en el espacio, cuando se utilizan caminos de propagación diferentes para transmitir la señal. En comunicaciones inalámbricas esto se consigue mediante diversidad de antenas, es decir, usando varias antenas transmisoras (diversidad en transmisión) y/o varias antenas receptoras (diversidad en recepción).
- Diversidad de polarización, cuando múltiples copias de la señal son transmitidas con polarizaciones distintas.
- Diversidad de usuarios, cuando el transmisor elige el mejor usuario entre varios candidatos de acuerdo con la calidad existente en cada canal.

Con relación a la diversidad espacial a través de la diversidad de antenas se tiene que según el número de antenas en ambos extremos de la comunicación se puede distinguir los siguientes sistemas, los cuales se considera puntos de partida de la tecnología MIMO:

- SISO (Single Input, Single Output): sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena transmisora y una sola antena receptora.
- MISO (Multiple Input, Single Output): sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas transmisoras, pero sólo una antena receptora. También se le conoce como diversidad en transmisión.
- SIMO (Single Input, Multiple Output): sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena de emisión y dos o más antenas receptoras. Se le conoce como diversidad en recepción.
- MIMO. Es decir, utilizará diversidad en el espacio a través del uso de varias antenas tanto en transmisión como en recepción.

Diversidad de antenas de recepción

Los sistemas MIMO usan la diversidad espacial para mejorar las prestaciones del sistema. Representando entonces un sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas en el extremo transmisor, y dos o más antenas en el extremo receptor. Según en qué extremo de la comunicación se da la diversidad, diferenciamos entre diversidad en recepción o diversidad en transmisión. Ambas pueden combinarse o darse por separado.

- Diversidad por selección: elige una de las antenas atendiendo a un criterio concreto: la que reciba la señal de más potencia, la que reciba la señal con mejor SNR, etc.
- Diversidad por conmutación: cambia la antena de recepción cuando la señal recibida no supera un cierto umbral.
- Diversidad por combinación, realiza una combinación lineal ponderada de todas las señales recibidas. Dependiendo de cómo sea la combinación, se divide a su vez varios tipos: de radio máximo, de igual ganancia, etc.

Diversidad de antenas de transmisión

La diversidad de antenas de transmisión se refiere al uso de dos o más antenas en el mismo transmisor. Existen varios tipos de diversidad de transmisión: con cambio de antena, con ponderado de frecuencia, a través de diversidad de retraso y a través de diversidad de código. MIMO generalmente usa esta última técnica.

La diversidad de código o técnicas Space-Time Coding (STC), codificación espacio-tiempo, es un método empleado para mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos usando diversidad de transmisión. STC se basa en transmitir redundantes copias codificadas de una trama de datos, con la esperanza de que al menos una de ellas llegue al receptor en buen estado y así ser posible su decodificación fiable. Estas copias son distribuidas a lo largo del tiempo y entre todas las antenas transmisoras disponibles.

Hay dos tipos de STC:

- STTC o Space-Time Trellis Coding. Consiste en generar códigos de Trellis (un código convolucional). Con este método obtenemos ganancia de codificación y ganancia de diversidad, además de una mejor BER. Sin embargo, el codificador/decodificador es más complejo de implementar.
- STBC o Space-Time Block Coding. Consiste en generar códigos en conjunto como un bloque de datos. Con este método se obtiene sólo ganancia de diversidad, pero son mucho menos complejos de implementar que STTC porque se basan en procesamientos lineales.

Multiplexación Espacial o Spatial Multiplexing (SM)

La demultiplexación espacial consiste en la división de una señal de mayor ancho de banda en varias señales iguales de menor ancho de banda. Espacial hace referencia a la transmisión, simultánea y por el mismo canal de frecuencia, de cada una de estas señales por medio de antenas diferentes. La multiplexación espacial es justamente el proceso contrario: la combinación de varias señales de menor ancho de banda en una señal de mayor ancho de banda. Estas dos técnicas son las que usan los transmisores y receptores MIMO respectivamente para aprovechar la propagación multicamino y es la responsable del aumento de la tasa de transmisión en dichos sistemas.

El orden de multiplexación espacial es el número de flujos de datos transmitidos paralelamente, y su valor máximo estará limitado por el menor del número de antenas transmisoras o de antenas receptoras. El incremento de la eficiencia espectral será proporcional a este orden.

No se puede entender SM sin un esquema de diversidad de antenas: es obligatorio utilizar varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor, ya que es lo que proporciona la diversidad espacial. Sin embargo, con SM no será necesario el conocimiento previo del canal.

Precoding y Beamforming

Precoding o precodificación en el sentido amplio de la palabra, se refiere a todas las técnicas de procesado espacial que se realizan en el transmisor MIMO. Pero en un sentido más específico, hace referencia a un caso especial de beamforming para transmisiones multidimensionales, como las que realizan los sistemas MIMO.

Beamforming convencional es una técnica de procesado de señales usada para controlar el patrón de radiación de nuestra antena. Aporta la funcionalidad de un filtro espacial y es aplicada tanto en transmisión como en recepción:

- En recepción, beamforming se utiliza para incrementar o disminuir la sensibilidad del receptor en una determinada dirección. Por ejemplo, podremos aumentar la sensibilidad en la dirección de la señal deseada, y reducirla en las restantes direcciones, reduciendo así interferencias y ruidos.
- En transmisión, beamforming se emplea para configurar el patrón de radiación de nuestra antena. Cambiando la forma del haz, podremos aumentar la directividad de la antena en una determinada dirección, y minimizar la ganancia de la antena para el resto de direcciones.

Propagación multicamino

Se denomina propagación multicamino o multitrayecto cuando entre un transmisor situado en un punto A y un receptor situado en un punto B hay un camino primario, definido como el más directo entre ambos. Inevitablemente no todas las señales que transmitimos entre estos puntos siguen este camino, sino que debido a las numerosas reflexiones y/o refracciones que sufren con los diversos obstáculos que encuentran a su paso, como montañas, edificios o incluso las mismas capas de la atmósfera, tomarán múltiples caminos distintos para alcanzar al receptor. Es una característica que presenta el canal radio de todos los sistemas de comunicaciones inalámbricos.

Las señales que recorren estos caminos “no primarios” llegarán al receptor en tiempos diferentes, ya que cada una de éstas ha seguido una ruta diferente al resto. Se dice entonces que tienen un desfase con respecto a la señal primaria. Según este desfase se producirán interferencias constructivas o destructivas provocando sumas o degradaciones de la señal original. La señal vista por el receptor, que no es más que una combinación lineal de las señales multicamino con la señal primaria, sufrirá interferencias constructivas o destructivas que se traducirán en sumas o degradaciones de la señal final. Un caso extremo que si el desfase es de 180° , la señal multicamino cancelará totalmente a la señal primaria, no teniendo señal en el receptor.

Funcionamiento de MIMO

Un sistema MIMO dispondrá de un transmisor con NT antenas transmisoras espacialmente distribuidas. El transmisor también contendrá un DSP (Digital Signal Processor, procesador digital de señales) que codificará un flujo de datos de un solo usuario con velocidad R, en NT “subflujos” de velocidad R/NT cada uno. Cada subflujo será modulado y enviado en paralelo hacia el canal inalámbrico por una antena diferente. Destacar que todos los subflujos se envían en el mismo intervalo de tiempo y a la misma frecuencia e, insistimos de nuevo, por antenas diferentes. En otras palabras, se enviarán múltiples señales simultáneamente por el mismo radiocanal.

MIMO saca ventaja del multicamino de la siguiente forma: cada ruta multicamino será tratada como un canal diferente, creando así una especie de “cable virtual” sobre el cual se transmite la señal. Cada ruta será un cable virtual, y el canal inalámbrico se comportará como un “mazo” de cables virtuales. Al emplear múltiples antenas separadas espacialmente, podremos aprovechar estos cables virtuales para transmitir más datos, multiplicando de esta manera el throughput (caudal efectivo). La tasa máxima por canal crecerá linealmente con el número de subflujos de datos diferentes que son transmitidos en el mismo canal. Además, debido a la diversidad de antenas, se incrementará también la distancia de cobertura.

Pero la transmisión sin cables no se comporta igual de bien que a través de cables, por lo que la comparación hecha no es precisa del todo. Cada señal transmitida bajo la influencia de la propagación multicamino seguirá una ruta diferente, el canal

inalámbrico actuará como un conjunto de cables, pero con gran grado de “fuga” entre ellos. Esto ocasionará que las señales transmitidas se mezclen juntas. Cada una de las N_R antenas del extremo receptor recibirá entonces una señal, fruto de la combinación de los múltiples subflujos transmitidos. El DSP del receptor, mediante complejos algoritmos de procesamiento de señales, separará cada uno de ellos, los ordenará y los combinará, recuperando así la señal original con los datos transmitidos originalmente.

Con un esquema de transmisión MIMO se consigue un incremento lineal en la eficiencia espectral frente al incremento logarítmico que consiguen otros sistemas tradicionales de una sola antena. En consecuencia, la cobertura (en términos de distancia), la calidad (en términos de BER, Bit Error Ratio, o probabilidad de error), la capacidad (referida en Bits/Hz/segundo o número de usuarios/Hz) y la tasa de bits (Bits/segundo) se verán mejoradas notablemente.

En la figura 5 se muestra el esquema general presente en un sistema MIMO.

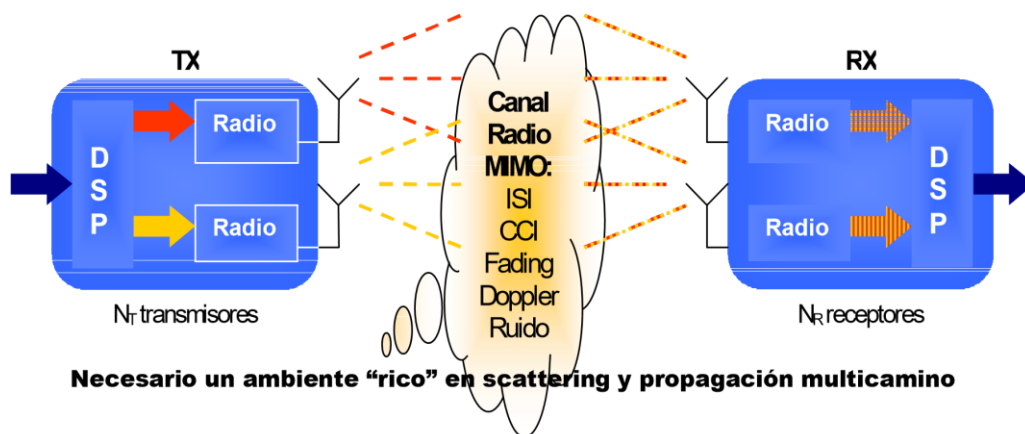


Figura 5 Esquema general de operación de un sistema MIMO [43]

Beneficios de MIMO

La tecnología mejora el rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico, multiplicando su eficiencia espectral. Esto se traduce en los siguientes beneficios para nuestra red o dispositivo MIMO:

- Tasa de bits. Permitiendo la transmisión simultánea de múltiples tramas de datos, MIMO multiplica la tasa de transmisión sin consumir más espectro. El

caudal efectivo o Throughput incrementa en un factor igual al número de señales transmitidas en paralelo por el mismo radiocanal y al mismo tiempo.

- Eficiencia espectral. MIMO es el único sistema que mejora la eficiencia espectral multiplicando al menos dos veces los bits transmitidos por Hz.
- Número de usuarios. Incrementa la capacidad y permite aumentar el número de usuarios que podrían conectarse simultáneamente a nuestra red en un mismo canal de frecuencia.
- Cobertura. Debido a las técnicas de diversidad, se alcanza distancias mayores sin aumentar la potencia de transmisión. Con un solo punto de acceso puede dar cobertura a una región de espacio más grande que antes.
- Aumenta la fiabilidad. La probabilidad de errores de transmisión de información es más baja.
- Coste. Debido a que un solo punto de acceso es capaz de soportar más usuarios, y a que con la misma potencia se mejora su alcance, necesitando un menor número de dispositivos, abaratando el coste de la red.

Tipos de MIMO

Se puede destacar dos tipos de MIMO: SU-MIMO (Single-User MIMO) y MUMIMO (Multi-User MIMO).

SU-MIMO (o Multi-antenna MIMO) Se Podría traducirlo como “MIMO de un solo usuario”, o como “MIMO punto-apunto” (Point-to-Point MIMO). Este tipo de tecnología consigue grandes mejoras en la eficiencia espectral, la capacidad del canal y la fiabilidad, esencialmente mediante el uso de técnicas como la multiplexación espacial o STC. Pero SU-MIMO no explota la diversidad de usuarios, el acceso múltiple: los grados de libertad (DoF, Degrees of Freedom) adquiridos con el uso de múltiples antenas son aprovechados para crear una transmisión multidimensional punto a punto, pero no punto a multipunto. Es decir, SU-MIMO no está diseñado para trabajar con varios usuarios al mismo tiempo. Esta es la característica diferencial con MU-MIMO.

MU-MIMO (o Multi-User & Multi-Antenna MIMO) Es radicalmente diferente a SU-MIMO. Representa un conjunto de técnicas y algoritmos avanzados, algunos autores

denotan a esta tecnología como “Advanced MIMO” o “MIMO avanzado, además de aprovechar las ventajas del uso de múltiples antenas, explota la multiplicidad de usuarios. Esta variación implica el acceso múltiple, es decir, el reparto espacial del canal entre múltiples usuarios, pudiendo crear transmisiones multidimensionales punto a multipunto (un usuario a muchos usuarios), o incluso multipunto a multipunto (varios usuarios a varios usuarios).

La figura 6 explica en forma gráfica el concepto básico de MU-MIMO.

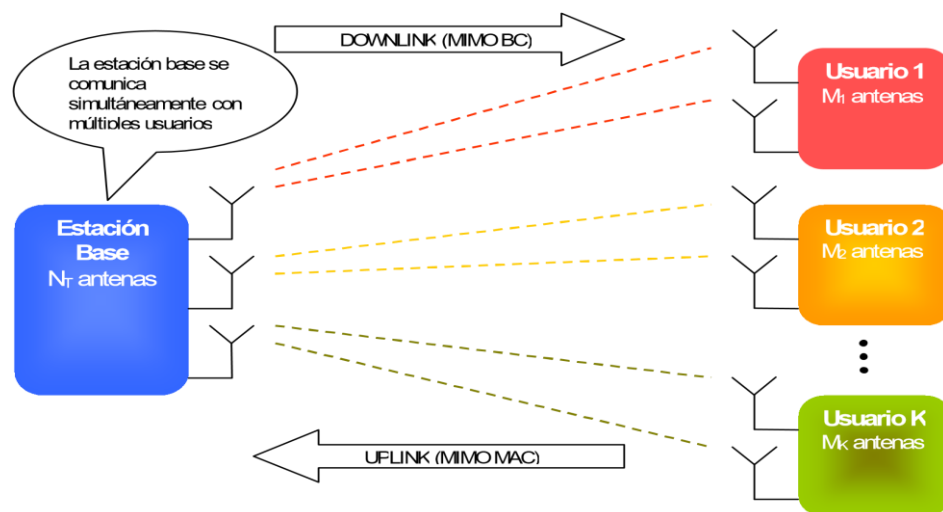


Figura 6 Concepto básico de MU-MIMO [43]

Técnicas SDMA y otras técnicas MU-MIMO

Esta variante de la tecnología MIMO da un giro radical al diseño de los protocolos de nivel de enlace para acceso múltiple, apareciendo nuevas técnicas como SDMA. (Space-Division Multiple Access). Es un método de múltiple acceso que permite a una estación transmitir (o recibir) señales hacia (o desde) múltiples usuarios, simultáneamente y en la misma banda de frecuencias. Al igual que hacía la multiplexación espacial, SDMA crea una serie de “cables virtuales” paralelos por los que viajan las señales, pero además ofrece un rendimiento superior en sistemas de comunicaciones radio con múltiples usuarios.

Clasificación de MU-MIMO

Los algoritmos Multi-User MIMO son desarrollados para sistemas con más de un usuario. Podemos diferenciar dos escenarios:

Punto a Multipunto

En escenarios donde la comunicación comprende desde un solo usuario con múltiples antenas hacia varios usuarios, o viceversa (Multi-user to/from multiantenna single-user). Dentro de este escenario se puede reconocer dos tipos de MIMO para cada uno de los enlaces, ascendente y descendente.

- MIMO Broadcast Channels o MIMO BC. Representa el enlace descendente (Estación base - Usuarios) para una topología punto a multipunto. La estación base utiliza procesadores avanzados para la transmisión, incluyendo técnicas como SDMA y precoding avanzado. Además, deberá conocer el estado del canal en todo momento (CSIT, de Channel State Information at the Transmitter).
- MIMO Multiple Access Channels o MIMO MAC. Hace referencia al enlace ascendente (Usuarios - Estación base) dentro de esta misma topología. En este caso la estación base actúa como receptor, por lo que también incluirá algoritmos avanzados para la recepción de la señal, como joint interferente cancellation o. También deberá conocer el estado del canal (CSIR, de Channel State Information at the Receiver) pero esta vez le será más fácil que conocer CSIT, ya que se puede basar en éste.

MIMO BC y MIMO MAC tienen un rendimiento superior a sistemas MIMO punto a punto (SU-MIMO), especialmente cuando el número de antenas en la estación base es mayor que el número de antenas de cada usuario.

Multipunto a Multipunto

En situaciones donde la comunicación va desde varios usuarios hasta varios usuarios y viceversa (Multi-user to Multi-user). Es el caso de Cooperative MIMO (CO-MIMO) también conocido como Network MIMO o Ad Hoc MIMO.

En las comunicaciones inalámbricas cooperativas, al contrario que las convencionales que intentan evitar las interferencias, cada nodo aprovecha su propia interferencia, y las interferencias de los nodos restantes de la red, para mejorar el rendimiento de la codificación y decodificación de datos. En CO-MIMO, un nodo usa múltiples antenas distribuidas que pertenecen a múltiples nodos diferentes. Ésta es una técnica muy útil

para redes celulares con topologías ad hoc inalámbricas, donde múltiples nodos transmisores se comunican con múltiples nodos receptores a la vez. [43]

Beamforming y MU-MIMO en 802.11ac

El MIMO multiusuario representa el mayor potencial de 802.11ac. Antes de 802.11ac, cada transmisión enviada se enviaba a un solo destino. La formación de haces se utiliza ocasionalmente en dichas redes como un medio para aumentar la potencia de la señal en una parte del territorio del AP para aumentar la velocidad de datos en el receptor. Las transmisiones multiusuario son una nueva capacidad dentro de 802.11. Las ondas de radio, como cualquier onda, se agregan por superposición. Si hay dos receptores ubicados en direcciones suficientemente diferentes, se puede enviar una transmisión con forma de haz a cada uno de ellos al mismo tiempo.

Una de las claves para construir una red 802.11 de cualquier tipo es reutilizar el mismo canal en múltiples lugares. MIMO multiusuario se basa en el enfoque de células pequeñas al permitir redes aún más compactas. MU-MIMO está en uso. Como resultado, el AP puede enviar transmisiones independientes dentro de su propia área de cobertura. Del mismo modo que los conmutadores Ethernet redujeron el dominio de colisión de un segmento de transmisión completo a un único puerto, MU-MIMO reduce la contención espacial de una transmisión y permite las primeras aplicaciones de "conmutación". [44]

Canales de radio en 802.11ac

Para el canal bien establecido de 20 MHz que ha sido ampliamente utilizado en 802.11 desde la primera estandarización de OFDM en 802.11a y el canal de 40 MHz utilizado en 802.11n, el 802.11ac ofrece dos nuevos tamaños de canales. Como se esperaba, los canales más amplios brindan un mayor rendimiento. Al igual que en la transmisión previa basada en OFDM, 802.11ac divide el canal en subportadoras OFDM, cada una de las cuales tiene un ancho de banda de 312.5 kHz. Cada una de las subportadoras se usa como una transmisión independiente, y OFDM distribuye los bits de datos entrantes entre las subportadoras. Algunas subportadoras están reservadas y se llaman portadoras piloto; no llevan datos de usuario y en su lugar se utilizan para medir el canal.

Diseño del canal de radio

Para aumentar el rendimiento, 802.11ac introduce dos nuevos anchos de canal. Todos los dispositivos 802.11ac son necesarios para admitir canales de 80 MHz, que duplica el tamaño del canal espectral sobre 802.11n. Además, agrega una opción de canal de 160 MHz para velocidades aún más altas. Debido a las limitaciones de encontrar un espectro contiguo de 160 MHz, el estándar permite que un canal de 160 MHz sea un solo bloque contiguo o dos canales no contiguos de 80 MHz.

La figura 7 muestra el diseño de los canales en términos de sus datos OFDM y operadores piloto definidos en 802.11ac, junto con los formatos de canal de 802.11a/g y 802.11n para la comparación. Cada línea horizontal representa el diseño de las subportadoras OFDM en un tipo de canal, desde los canales de 20 MHz utilizados por primera vez con OFDM hasta el canal más amplio que 802.11ac tiene para ofrecer. Los portadores experimentales están representados por los saltos hacia abajo en la línea para mostrar que no llevan datos.

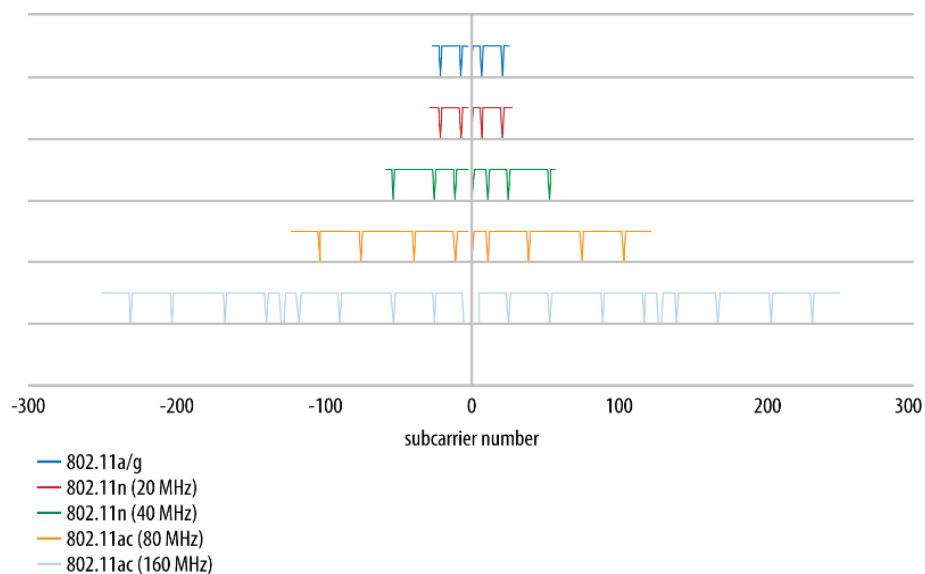


Figura 7 Diseños de canal en 802.11ac [45]

Las portadoras son una forma de sobrecarga utilizada en OFDM, y representan una sobrecarga para el canal. En los sistemas MIMO, un único operador puede ser más eficaz para ayudar con las operaciones de ajuste de canal. El rango de las subportadoras define el ancho del canal en sí. Cada subportadora tiene una capacidad idéntica de transporte de datos. Las subportadoras son una sobrecarga de protocolo y se utilizan

para llevar a cabo mediciones importantes del canal. A medida que aumenta el tamaño del canal, la fracción del canal dedicado a los portadores disminuye. Como resultado, el canal se vuelve más eficiente a medida que aumenta el ancho.

Máscara espectral de canal de radio

Los canales 802.11ac tienen exactamente la misma forma que los canales OFDM anteriores, difiriendo solo en el ancho de la energía transmitida.

La figura 8 muestra la forma general de un canal 802.11ac, que se describe como decibelios relativos (dBr) al nivel máximo en la frecuencia central del canal. La figura no etiqueta las frecuencias precisas utilizadas porque la máscara espectral tiene la misma forma sin importar el tamaño de canal que se use.

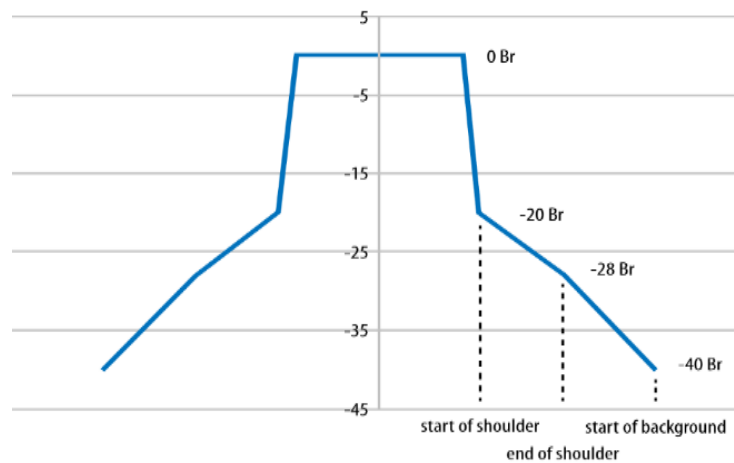


Figura 8 Máscara espectral [45]

Mapa de canal disponible

Definir los canales disponibles es más una cuestión regulatoria que técnica. Los equipos LAN inalámbricos están contruidos con chips de radio flexibles que pueden sintonizar casi cualquier frecuencia, y los estándares 802.11 han definido una gran cantidad de canales. 802.11ac continúa utilizando la misma numeración de canal definida por sus predecesores.

La figura 9 muestra el diagrama identificando la banda de frecuencia y los números de canal dentro de esa banda.

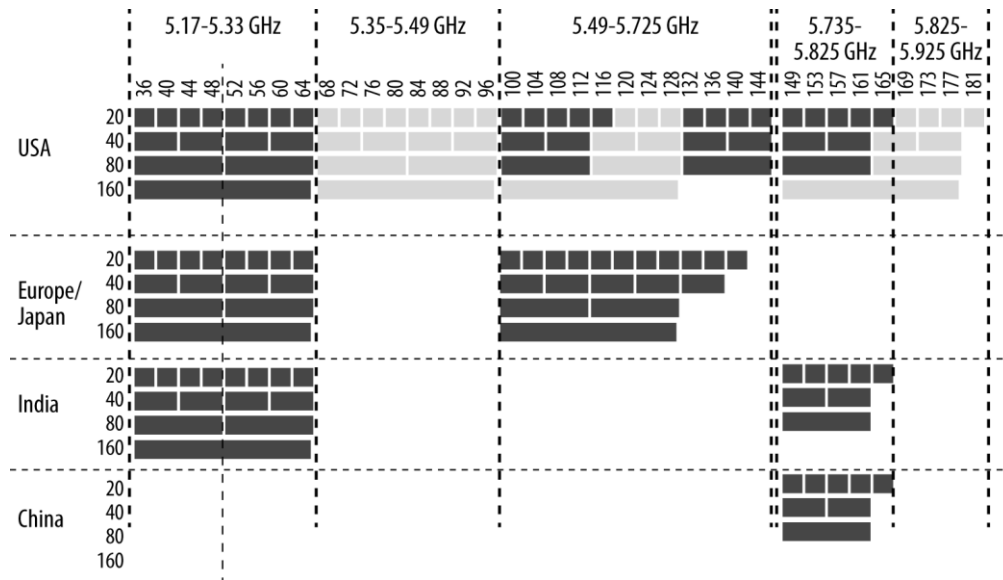


Figura 9 Mapa de canales disponibles para 802.11ac [45]

Los números de canal están espaciados a cuatro dígitos, pero dentro de un canal ancho, una de las frecuencias se designa como el canal primario, otros se llaman canales secundarios. Cuando se utiliza como parte de un canal de 80 MHz, el canal 44 puede ser el canal primario, y los canales 36, 40 y 48 serán todos canales secundarios. Los canales primarios y secundarios son importantes para las características de coexistencia de ancho de banda.

Los reguladores son generalmente conscientes de la necesidad de espectro adicional, especialmente para hacer que haya canales más amplios disponibles para velocidades máximas. La especificación 802.11ac define la numeración y el diseño del canal, pero la decisión final sobre si se puede usar un segmento específico de espectro corresponde al regulador nacional.

Transmisión: Modulación, Codificación e Intervalo de Guardia

802.11ac simplifica la selección de modulación y codificación descartando las opciones de modulación desiguales que rara vez se implementan. La tecnología de modulación mejorada proporciona uno de los principales puntos donde 802.11ac aumenta la velocidad. El uso de la modulación 256-QAM más agresiva permite que el paquete de enlace contenga dos bits más en cada portadora, para un total de ocho bits en lugar de seis. Agregar dos bits aumenta la capacidad en un tercio.

Conjunto de modulación y codificación (MCS)

Seleccionar un conjunto de modulación y codificación (MCS) es mucho más simple. La especificación 802.11ac tiene 10 opciones. Los primeros siete son obligatorios, y la mayoría de los proveedores admitirán 256-QAM, y por lo tanto las nueve opciones de MCS. La modulación describe cuántos bits están contenidos dentro de un incremento de tiempo de transmisión. Las modulaciones más altas empaquetan más datos en la transmisión, pero requieren relaciones mucho más altas de señal a ruido. Uno de los atributos fundamentales de un código de corrección de errores es que agrega información redundante en una proporción descrita por la tasa de código. Un código con una tasa $R = 1/2$ transmite un bit de datos de usuario por cada dos bits en el canal. Las tasas de código más altas tienen más datos y menos redundancia a costa de no poder recuperarse de tantos errores. La modulación y la codificación se combinan en un único número, el índice MCS. Cada uno de los valores de MCS puede conducir a un amplio rango de velocidades dependiendo del ancho del canal, el número de flujos espaciales y el intervalo de guarda.

La tabla 5 resume el índice de modulación, modulación y la tasa de código.

Tabla 5 Valores de MCS para 802.11ac [45]

Valor del índice MCS	Modulación	Tasa de código (R)
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

Modulación 256-QAM

Los estándares 802.11 anteriores permitían hasta 64-QAM, lo que permitía que cada símbolo de transmisión tomara uno de los 64 valores. En un nivel alto, la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) funciona al usar la combinación del nivel de amplitud y el desplazamiento de fase para seleccionar uno de muchos símbolos en la constelación. Para identificar cada uno de los 64 valores, hay ocho niveles de fase (en líneas generales, un desplazamiento de fase) y ocho niveles de cuadratura (aproximadamente, la amplitud de una onda). Cada vez que se transmite un símbolo, puede tomar uno de los ocho cambios de fase y uno de los ocho niveles de amplitud.

Al igual que con muchos otros aspectos del protocolo, 802.11ac eleva la tecnología existente a una muesca utilizando 256-QAM. En lugar de una constelación que es 8 por 8, la constelación de 256 QAM tiene 16 cambios de fase y 16 niveles de amplitud. La gran cantidad de puntos extra en el punto de la constelación 256-QAM tiene el potencial de mejorar dramáticamente la velocidad. En lugar de transmitir un máximo de seis bits en cada subportadora en el canal, un enlace codificado con 256 QAM transmite ocho bits.

Para utilizar 256-QAM, los errores en el enlace de radio deben ser mucho más pequeños que antes. En un enlace perfecto con las transmisiones ideales que se reciben absolutamente sin errores, los puntos recibidos se alinean exactamente en los puntos de la constelación, y es fácil entender lo que debería haberse transmitido. Los enlaces de radio del mundo real nunca son perfectos, sin embargo. Cuando se recibe un símbolo, no se alinea exactamente en el punto de la constelación. [45]

Intervalo de guarda

802.11ac conserva la capacidad de seleccionar un intervalo de guarda OFDM acertado si tanto el transmisor como el receptor pueden procesarlo. El intervalo de protección se reduce de 800ns a 400ns, lo que proporciona un aumento del 10% en el rendimiento. La mayoría de las implementaciones 802.11n han demostrado ser capaces de implementar el intervalo de protección breve sin dificultad o efectos adversos.

Códigos de corrección de errores

802.11ac no realiza ningún cambio en los códigos de corrección de errores admitidos. Los códigos convolucionales son requeridos, ya que se han requerido para todas las PHY OFDM. La codificación LDPC es compatible como una opción, y típicamente ofrece una ganancia de 1-2 dB sobre la codificación convolucional. Por lo tanto, es probable que se admita en combinación con las velocidades de datos muy altas admitidas por 256-QAM y paquetes largos transmitidos en cuadros agregados. Al habilitar velocidades de datos más altas, LDPC también ayudará a aumentar las velocidades de datos. Un aumento en la velocidad de datos puede permitir una reducción en el tiempo de transmisión y, por lo tanto, un ahorro general de energía. [45]

2.6. Simulador NS-3

NS-3 es un simulador de eventos discretos dirigido principalmente para investigación y uso educativo. El proyecto es de código abierto. Ha sido desarrollado para proporcionar una plataforma de simulación de red abierta y extensible, para investigación y educación en redes. Proporciona modelos de cómo funcionan las redes de datos por paquetes, y proporciona un motor que realiza experimentos de simulación. Permite realizar estudios que son más difíciles o imposibles de realizar con sistemas reales, estudiar el comportamiento del sistema en un entorno altamente controlado y reproducible, y aprender cómo funcionan las redes.

El modelo disponible establecido se enfoca en modelar cómo funcionan los protocolos y redes de Internet, pero no se limita a los sistemas de Internet. Está diseñado como un conjunto de bibliotecas que se pueden combinar juntas y también con otras bibliotecas de software externas. Mientras que algunas plataformas de simulación proporcionan a los usuarios un único entorno de interfaz gráfica de usuario integrado en el que se llevan a cabo todas las tareas. Se pueden usar varios animadores externos y herramientas de visualización y análisis de datos.

2.6.1. Entorno de desarrollo

La programación se hace en C++ y Python, a partir del NS-3.2, la mayoría de las API ya están disponibles en Python, pero los modelos siguen siendo escritos en C++. Sólo se revisarán conceptos avanzados, posibles características poco utilizadas del lenguaje, dialectos y patrones de desarrollo. El objetivo no es hacer este un tutorial de C++, aunque es necesario saber lo básico del lenguaje. Para ello, hay un número muy grande de fuentes de información en la Web y en materiales impresos (libros, tutoriales, revistas, etc).

Utiliza diversos componentes de la cadena de herramientas GNU - "herramientas GNU" - para el desarrollo. Un software de cadena de herramientas es un conjunto de herramientas de programación para un entorno particular. Por lo general, un usuario ns-3 funcionará en Linux o un entorno basado en él. [46], [47]

2.6.2. Modelos de simulación

El proyecto NS-3 tiene como compromiso construir un núcleo de simulación sólido que esté bien documentado, fácil de usar y depurar, y que cubra las necesidades de todo el flujo de trabajo de simulación, desde la configuración de simulación hasta la recopilación y el análisis.

Fomenta el desarrollo de modelos de simulación lo suficientemente realistas para permitir que se utilice como un emulador de red en tiempo real, interconectado con el mundo real y que permita reutilizar muchas implementaciones de protocolos reales.

El núcleo de simulación admite investigaciones en redes basadas en IP y en redes que no son IP. Sin embargo, la gran mayoría se centra en simulaciones inalámbricas/IP que incluyen modelos para Wi-Fi, WiMAX o LTE para las capas 1, 2, y una variedad de protocolos de enrutamiento estáticos o dinámicos como OLSR y AODV.

También es compatible con un programador en tiempo real que facilita una cantidad de casos de uso de "simulación en el bucle" para interactuar con sistemas reales. Se puede emitir y recibir paquetes generados por NS-3 en dispositivos de red reales, y puede servir como un marco de interconexión para agregar efectos de enlace entre máquinas virtuales. Otro énfasis del simulador es la reutilización de la aplicación real y el código del kernel.

Debido a que la creación de un simulador de red que tenga un número suficiente de modelos validados y mantenidos de alta calidad requiere mucho trabajo, se intenta extender esta carga a una gran comunidad de usuarios y desarrolladores. Cada tres meses se emite una nueva versión estable con nuevos modelos desarrollados, documentados, validados y mantenidos por entusiastas investigadores. [48]

2.6.3. Tecnologías

NS-3 es una biblioteca C++ que proporciona un conjunto de modelos de simulación de red implementados como objetos de C++ y envueltos a través de python. Se interactúa con esta biblioteca escribiendo una aplicación en código de C++ o python que crea una instancia de un conjunto de modelos de simulación para configurar el

escenario de simulación de interés, entra en el bucle principal de simulación y sale cuando se completa la simulación.

La biblioteca NS-3

La biblioteca NS-3 está envuelta en python por medio de la biblioteca pybindgen, que delega el análisis sintáctico de los encabezados en gccxml y pygccxml para generar automáticamente el correspondiente vínculo con C++. Estos archivos generados automáticamente se compilan finalmente en el módulo NS-3 python para permitir interactuar con los modelos C ++ NS-3 y core a través de scripts Python.

Diseño de alto nivel

En comparación con otros simuladores de red de eventos discretos, ns-3 se distingue por los siguientes objetivos de diseño de alto nivel.

Énfasis de C ++ y Python

Muchos simuladores usan un lenguaje de modelado específico de dominio para describir modelos y flujo de programa. ns-3 usa C ++ o Python, lo que permite aprovechar el soporte completo de cada lenguaje de programación.

Eventos y conexiones de devolución de llamada

Los eventos de simulación son simplemente llamadas a funciones que están programadas para ejecutarse en un tiempo de simulación definidos. Cualquier función puede convertirse en un evento y programarse mediante el uso de una función de devolución de llamada. Esto está en contraste con las funciones especializadas que centralizan el procesamiento de eventos en cada objeto de simulación. Las rellamadas también se usan mucho en el simulador para reducir las dependencias de tiempo de compilación entre los objetos de simulación.

Núcleo flexible con capa de ayuda

El simulador presenta una poderosa API de bajo nivel que permite a los usuarios avanzados la flexibilidad de configurar las cosas de diferentes maneras. En la parte superior de este se encuentra un conjunto de capa "auxiliar" que proporcionan funciones más fáciles de usar con un comportamiento predeterminado razonable. Se

pueden mezclar y combinar las API más simples en la capa auxiliar y las API completas que se encuentran debajo.

Énfasis en la emulación

El diseño de simulación está orientado a casos de uso que permiten que el simulador interactúe con el mundo real. Los objetos se almacenan internamente como búferes de byte de paquetes listos para ser serializados y enviados a una interfaz de red real. Se han desarrollado varios marcos de simulación en el lazo y de integración de máquina virtual, y se han llevado a cabo experimentos en bancos de pruebas inalámbricos.

Énfasis en la reutilización de software

Se ha desarrollado un entorno de ejecución de código directo junto con el simulador que permite a los usuarios ejecutar muchas aplicaciones que cumplen con POSIX dentro de la simulación, sin requerir cambios en el código de la aplicación.

Alineación con interfaces del mundo real

Los nodos se diseñan según la arquitectura de red de Linux, y las interfaces y objetos clave (sockets, dispositivos de red) se alinean con los de una computadora con Linux. Esto facilita la reutilización del código y mejora el realismo de los modelos, y hace que el flujo de control del simulador sea más fácil de comparar con los sistemas reales.

Gestión de configuración

El simulador presenta un sistema integrado basado en atributos para administrar los valores predeterminados y por instancia para los parámetros de simulación. Todos los valores predeterminados configurables para los parámetros son gestionados por este sistema, integrado con el procesamiento de argumentos de línea de comandos, la documentación de Doxygen y un subsistema de configuración basado en XML y opcional basado en GTK.

La falta de un IDE

El proyecto no mantiene un entorno de desarrollo integrado (IDE) para configurar, depurar, ejecutar y visualizar simulaciones en una única ventana de aplicación, como las encontradas en otros simuladores. En cambio, el flujo de trabajo típico es trabajar

en la línea de comandos e integrar las herramientas de configuración y visualización según sea necesario. Algunos desarrolladores han usado Eclipse como desarrollo IDE. [49]

2.7. Propuesta de Solución

Con la evaluación del estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO en comparación con los estándares de Fibra Óptica, se pueden obtener las características de operación, velocidad, confiabilidad, entre otros parámetros, aplicados en redes de transporte de datos, permitiendo optimizar recursos en la implementación de las mismas.

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA

3.1. Modalidad de la investigación

El tipo de investigación planteada es aplicada ya que mediante ésta se pone en práctica los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de la investigación sobre el uso de la tecnología y los estándares adecuados en las redes de transporte de datos.

Investigación Bibliográfica, debido a que la recopilación de información sobre el tema central es referenciada y recolectada de repositorios, publicaciones y artículos científicos disponibles en internet. Permite sustentar la investigación con criterios y conocimientos de personas especializadas en temas relacionados, permitiendo además establecer conceptos, ampliar conocimientos y profundizar la información para construir un marco teórico fuerte que permite respaldar el proceso investigativo.

La investigación experimental permite utilizar el método científico en conjunto, mediante una serie de experimentos un repetido número de veces en condiciones idénticas, similares o diferentes para determinar que sucede.

3.2. Recolección de Información

La información a procesarse, proviene de fuentes o referencias bibliográficas obtenidas de ejemplares de investigaciones previas, ubicados en los repositorios de diferentes universidades locales y extranjeras, tanto como publicaciones, informes y artículos provenientes de revistas de investigación científica.

3.3. Procesamiento y Análisis de Datos

La información obtenida está organizada metódicamente, de tal forma que contribuye con el óptimo desarrollo de la investigación de la siguiente manera:

- Realizar un análisis de los datos obtenidos en la investigación previa sobre el desempeño del estándar IEEE 802.11ac con relación al estándar de Fibra óptica en su aplicación para redes de transporte de datos.
- Efectuar el procesamiento e interpretación de la información obtenida en función de los objetivos planteados y del marco teórico.
- Presentación de resultados y determinación las conclusiones obtenidas de la investigación realizada.

3.1. Desarrollo del proyecto

- Analizar los estándares utilizados en Fibra Óptica.
- Establecer las características técnicas de los estándares de la Fibra Óptica.
- Elaborar cuadros descriptivos sobre los estándares de la Fibra Óptica.
- Analizar la forma de operación de estándar IEEE 802.11ac.
- Establecer características técnicas del estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO.
- Elaborar cuadros descriptivos del estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO.
- Identificar herramientas para la simulación de redes de transporte de datos utilizando estándares.
- Simular de redes de transporte de datos utilizando el estándar IEEE 802.11ac.
- Simular de redes de transporte de datos utilizando estándares de la Fibra Óptica.
- Elaborar cuadros comparativos sobre la información obtenida en la simulación de redes utilizando tanto el estándar IEEE 802.11ac como los de Fibra Óptica.
- Determinar las características, rangos de operación, velocidad, confiabilidad del estándar inalámbrico con relación a los estándares de fibra óptica.
- Elaborar de forma detallada el informe final.

CAPÍTULO IV.

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1. Introducción

Los constantes avances científicos en materia de telecomunicaciones generan la necesidad de evaluar las tecnologías existentes antes de implementarla, esta evaluación se lo puede hacer por medio de un software de simulación, pues por medio de software es factible predecir que comportamiento tendrá una red antes de ser implementada, además permite la selección de la tecnología que mejor se ajuste a las necesidades de la red de datos, también se puede estimar los equipos adecuados requeridos para dicha red. El uso de software de simulación si es software libre, evita a cualquier organización gastos administrativos en la prueba de tecnologías, sin contar que en la actualidad existen simuladores que se ajustan a las necesidades propias del mundo real haciendo que los datos obtenidos del software sean muy similares a los emitidos por dispositivos reales.

A continuación, se presenta la evaluación de redes de transporte tanto de fibra óptica por medio de DWDM para medios guiados, también utilizando el estándar IEEE802.11ac MU-MIMO para medios no guiados, para lo cual se utiliza el software de simulación NS-3.

4.2. Factibilidad

Se evalúa la disponibilidad de los recursos a fin de orientar la toma de decisiones en la realización del proyecto.

4.2.1. Factibilidad técnica

El proyecto investigativo es técnicamente factible dado que existen los equipos y herramientas necesarias requeridos para su realización.

4.2.2. Factibilidad bibliográfica

El proyecto se fundamenta en la existencia de diferentes fuentes bibliográficas como libros, revistas técnicas, publicaciones y artículos científicos afines al tema, por tanto, es bibliográficamente factible.

4.2.3. Factibilidad económica

El proyecto de investigación es económicamente factible puesto que los recursos requeridos para su realización son financiados en su totalidad por el investigador.

4.3. Requerimientos

Según con lo expuesto se presenta los requerimientos de análisis de las redes de transporte de datos tanto por medio de DWDM en fibra óptica, así como del estándar IEEE802.11ac con tecnología MU-MIMO.

- Resumen de información cualitativa y cuantitativa relacionado a parámetros utilizados en el diseño de redes de transporte de datos.
- Diseño de los algoritmos de simulación para redes de transporte de datos.
- Simulación de redes de transporte de datos utilizando la tecnología DWDM.
- Simulación de redes de transporte de datos utilizando el estándar IEEE802.11ac.
- Obtención y análisis de los datos recopilados del simulador NS-3.

4.4. Cuadros descriptivos redes ópticas

En la aplicación de la fibra óptica como medio de transmisión en redes de transporte de datos, se toma en consideración primordialmente las ventajas y desventajas que conlleva en el uso de la misma con relación al uso de otros medios guiados de cobre.

Los mismos que son resumidos en la tabla comparativa 6.

Tabla 6 Ventajas y desventajas de la Fibra Óptica

Ventajas	Desventajas
Elevado ancho de banda	Necesidad de usar transmisores y receptores más caros
Reducido valor de atenuación	Las radiaciones gamma hacen que los cables de fibra óptica emitan luz, lo que genera interferencia.
Inmunidad al ruido eléctrico	Desarrollo lento de los estándares de fabricación, puesto que no están aun claramente establecidos.
Resistencia a factores ambientales	Tratamiento particularmente cuidadoso en el cableado
Seguridad Alta	Cambios en la atenuación por moléculas de hidrogeno
Ideal para ambientes inflamables	Los campos eléctricos de voltajes muy altos pueden afectar al cable de fibra óptica de la misma forma que los rayos gamma
Reducido tamaño y peso	Necesidad de un alto grado de precisión cuando se conectan cables y terminales o conectores
Insensibilidad a los parásitos	Necesidad de tener en cuenta la resistencia mecánica de las fibras
Gran resistencia mecánica	Los diminutos núcleos de los cables deben alinearse con extrema precisión al momento
Facilidad para localizar los cortes o intrusiones	El costo relativamente alto en comparación con los otros tipos de cable.
No presenta peligros de descarga eléctrica.	La especialización del personal encargado de realizar las soldaduras y empalmes

Fuente: [23], [24], [25], [26], [27].

La principal tecnología de fibra óptica a emplearse en redes de transporte es WDM, con sus variantes CWDM y DWDM ya explicados en el segundo capítulo, se toma una relación de los parámetros destacables a considerar en la selección de la tecnología adecuada que cumpla con los requerimientos de la red a desarrollarse.

La tabla 7 muestra una comparativa realizada por las tecnologías CWDM y DWDM tanto en aplicaciones de largo alcance, así como de corto alcance.

Tabla 7 Comparativa CWDM y DWDM

CWDM	DWDM
Redes MAN	Redes a larga distancia
Hasta 18 canales	Hasta 80 canales
Espacio 20nm	Espacio 25 hasta 100GHz
Canales 100Mbit hasta 10Gbps	Canales 1 Gbps hasta 100Gbps
Limitados requisitos de estabilidad	Laser de mayor estabilidad
Reducido costos de implementación	Tecnología más actualizada
Consumo de menor potencia	Mayor consumo de potencia

Fuente: [33], [34], [32]

4.5. Cuadro descriptivos MU-MIMO IEEE 802.11ac.

La tabla 8 muestra un resumen de las ventajas y desventajas del uso de redes inalámbricas.

Tabla 8 Ventajas y desventajas de las redes inalámbricas

Ventajas	Desventajas
Movilidad permitiendo acceso en tiempo real en cualquier lugar.	Presentan una menor velocidad en comparación a una red cableada.
Fácil Manejo e instalación	Propensas a las interferencias de señales.
Flexibilidad pues permite ir donde la alámbrica no puede ir.	Seguridad, presenta mayor vulnerabilidad.
Costo de propiedad reducido en ambientes que requieren movimientos frecuentes.	Menor ancho de banda: En comparación a las alcanzada por las redes cableadas.
Escalabilidad pues pueden ser configurados en una variedad de topologías.	La potencia de transmisión se verá afectada por los agentes físicos.
Comodidad de conectarse desde distintos puntos.	Son un poco más inestables que las redes cableadas.
Compatibilidad entre dispositivos estandarizados por la IEEE.	Dificultad en la alineación de las antenas direccionales.
No existen cables físicos.	
Permite la posibilidad de conectar nodos a grandes distancias de la base transmisora.	
Permite crear una red en áreas geográficas complicadas	

Fuente: [38], [39]

La tabla 9 muestra las características destacables del estándar IEEE802.11ac, tomando en consideración parámetros como la frecuencia de operación, canales soportados y demás características técnicas relevantes del estándar.

Tabla 9 Características MU-MIMO

Parámetros	IEEE 802.11ac
Frecuencia de Operación	5GHz
Canales soportados	20, 40, 80 y hasta 160 MHz
BeamForming	Si
MU-MIMO	Si
Distancia	Extensa
Máxima tasa de transferencia	1.3 Gbps

Fuente: [43], [44], [45]

4.6. Simulación de Redes de Transporte de Datos

El simulador de redes es una herramienta de pruebas que permite la comprensión de los diferentes protocolos en base a la obtención de resultados esperados. En este proyecto de investigación se utilizan dos herramientas de simulación para el análisis de redes de transporte de datos

Para la simulación se toma en consideración la herramienta NS-3, esto se debe principalmente porque soporta la evaluación de redes del tipo inalámbricas, la versión ns-3-wdm permite la simulación de redes ópticas y ns-3-allinone en cambio de redes

bajo estándares inalámbricos, uno de estos es el estándar IEEE802.11 con sus respectivas variantes o enmiendas.

4.6.1. Esquema de simulaciones

En el desarrollo de las simulaciones de redes punto a punto para el entorno ideal, es necesario tomar en consideración que presentan características de funcionamiento únicas a las que se pretende llegar a fin de obtener el mayor provecho de la tecnología desarrollada.

El esquema de simulación determina los requisitos y parámetros técnicos necesarios que permitan al simulador por medio de campos virtuales, generar de forma correcta la información requerida por el usuario, permitiendo así obtener los datos que se esperan alcanzar en la realidad. Las simulaciones de ambientes de red es un factor importante dentro del análisis pues determinan previamente los parámetros y configuraciones necesarios para alcanzar los resultados deseados.

Es necesario la generación del algoritmo de programación que permita determinar los pasos que debe seguir el software NS-3 en la simulación de las redes de datos. Para la generación del algoritmo a aplicar se debe tomar en cuenta los estándares a ser evaluados. Los algoritmos de programación definen la simulación de redes de transporte de datos ideales en donde generalmente no se toma en consideración factores como el ruido en sus diferentes formas, el Jitter y otros tipos de interferencia que, si se deben tomar en cuenta al implementar las redes en el mundo real. Los factores no tomados en cuenta están relacionados al ambiente físico en el cual una red es implementada. Uno de esos factores primordiales es la distancia, cuando la distancia entre dos puntos excede a lo recomendado, la comunicación entre los puntos del enlace decae notablemente e inclusive se puede llegar a perder completamente la comunicación. Tomando como premisa lo anterior, para la simulación de las redes de datos se asume una distancia infinita.

En las redes inalámbricas por medio del estándar 802.11ac se determina además que el dispositivo transmisor tenga la cobertura necesaria para que exista la constante comunicación con el dispositivo receptor, en un ambiente real esto está determinado

por la estabilidad de las torres o contenedores de los equipos, así como de una correcta alineación de los mismos.

La potencia de transmisión, así como la potencia de recepción son infinitas para un entorno de simulación, sin embargo, en redes de transporte reales es necesario el cálculo de potencias con sus respectivas pérdidas de transmisión. Además, se debe tomar en consideración que, para garantizar una buena comunicación entre equipos, tanto el transmisor como el receptor deben tener el mismo nivel de potencia, un desbalance en cualquiera de los equipos ocasionaría fallos en la transmisión de la información, pues el equipo con menor potencia tendrá mayor dificultad para alcanzar al equipo de mayor potencia.

4.6.2. Criterios de diseño en redes de Fibra óptica

Los parámetros a tomarse en cuenta para la simulación de redes de fibra óptica ideales son las siguientes:

- Atenuación
- Distancia variable
- Multiplexación DWDM
- Un solo canal

4.6.3. Diagrama de Flujo en la Simulación de redes de Fibra Óptica

El diagrama de operaciones se ajusta a las recomendaciones del simulador y a la vez permite la localización de segmentos a fin de realizar cambios respectivos para su manipulación.

El proceso inicia con la parametrización de variables de simulación, entre estas está el tiempo requerido, la distancia y el tamaño que tendrán los paquetes de datos a enviar. Luego de obtenido los parámetros necesarios se debe proceder a la definición de los nodos OXC (Optical cross-connect) y TxRX (Equipos de Transmisión/Recepción), las funciones predefinidas requieren de una potencia óptica de transmisión, así como de la atenuación por kilómetro.

La siguiente sección corresponde al llamado de los procedimientos que permiten simular la red de transporte, entre ellas existe la conexión entre los dispositivos pues con ello los dispositivos creados se enlazaran formando una topología adecuada, la asignación de direcciones IP permite el reconocimiento de los equipos en la red por medio de un identificativo único. Por medio del llamado a la aplicación de protocolo de internet y el protocolo UDP es posible la simulación del transporte de paquetes desde un origen a su destino para su posterior cálculo del Throughput. Finaliza con la visualización del parámetro calculado.

Valores parametrizados en NS-3 para la Simulación de redes DWDM

- Tiempo de simulación = 1 segundo
- Distancia = 10 a 50000 metros
- Tamaño del Payload = 1088Mbps
- Velocidad de Transmisión = 10Gbps
- Potencia Óptica = 10mw
- Atenuación por kilómetro = 0,4dbm
- Longitud de onda = 1550nm (Tercera ventana)

El diagrama de flujo descrito, se lo evidencia de mejor manera en la figura 10.

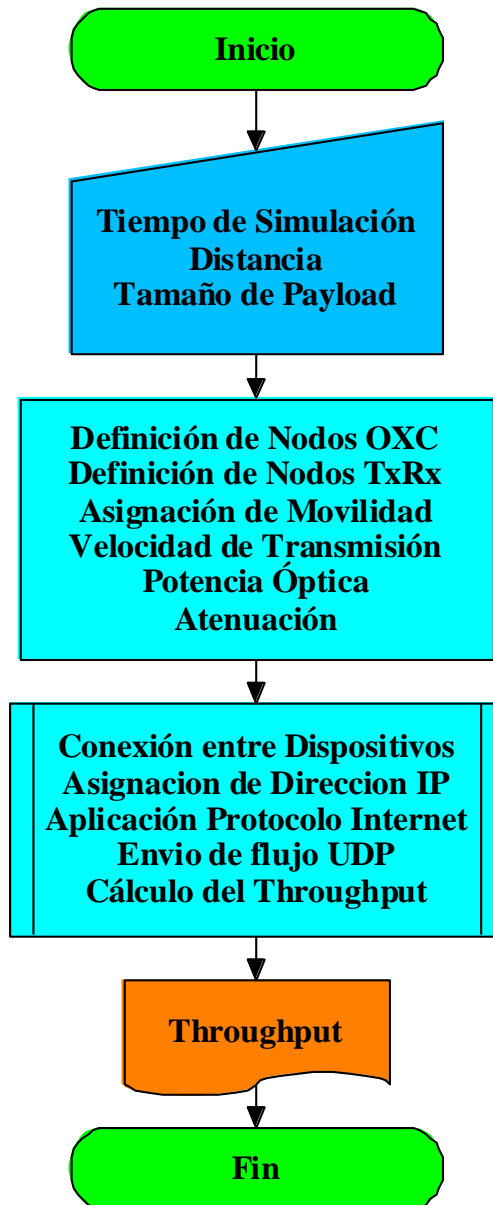


Figura 10 Diagrama de flujo en la simulación de redes de Fibra Óptica
Elaborado por: Investigador

4.6.4. Criterios de diseño en redes IEEE 802.11ac

Los parámetros que se deben tomar en cuenta para alcanzar una velocidad de recepción de hasta 1.3 Gbps que determina el estándar son las siguientes.

- Ancho de banda del canal que se utiliza 20, 40, 80 y 160MHZ
- Antenas MU-MIMO
- Índice de Modulación
- Distancia Ideal fija

4.6.5. Diagrama de Flujo en la Simulación de redes IEEE802.11ac

De la misma forma que en el diagrama de flujo en la simulación de redes de fibra óptica, se inicia con la parametrización del tiempo de simulación, la distancia entre equipos y el ancho del canal que se va a utilizar, los canales admitidos son los existentes en el estándar IEEE802.11ac.

En la siguiente sección existe un control para el índice de modulación MCS, esto se debe a que el canal de 20 MHz solamente admite MCS de 8, mientras tanto que los canales de 40, 80 y 160MHz admiten un MSC de 9. Acto seguido se inicia un ciclo que permite cambiar el MSC calculando el Throughput en cada uno de ellos, dentro del ciclo se tiene todas las operaciones que hacen factible la obtención del Throughput, esto es la asignación del tamaño del paquete a enviar, el número de antenas que va a utilizar MU-MIMO, así como la cantidad de las mismas que van a ser utilizadas tanto para transmitir como para recibir. También es factible configurar si el intervalo de guarda es largo o corto.

En la parte siguiente se realiza el llamado a los procedimientos de asignación de Direcciones IP al igual que en las redes de fibra óptica, así como el protocolo de internet y el protocolo UDP. Finalmente se realiza el cálculo del Throughput y finaliza con la visualización del mismo en pantalla. Este proceso se lo realiza hasta que el contador del ciclo sea mayor al índice de modulación máximo.

Valores parametrizados en NS-3 para la Simulación de redes IEEE802.11ac

- Tiempo de simulación = 1 segundo
- Distancia = Infinita
- Tamaño del Payload = 1088Mbps
- Ancho de canal = 20,40,80,160Mhz
- Direcciones IP: Dinámico en red 192.168.0.0/24
- Atenuación por kilómetro = 0,4dbm

Todos los procesos detallados del diagrama de flujo se verifican en la figura 11.

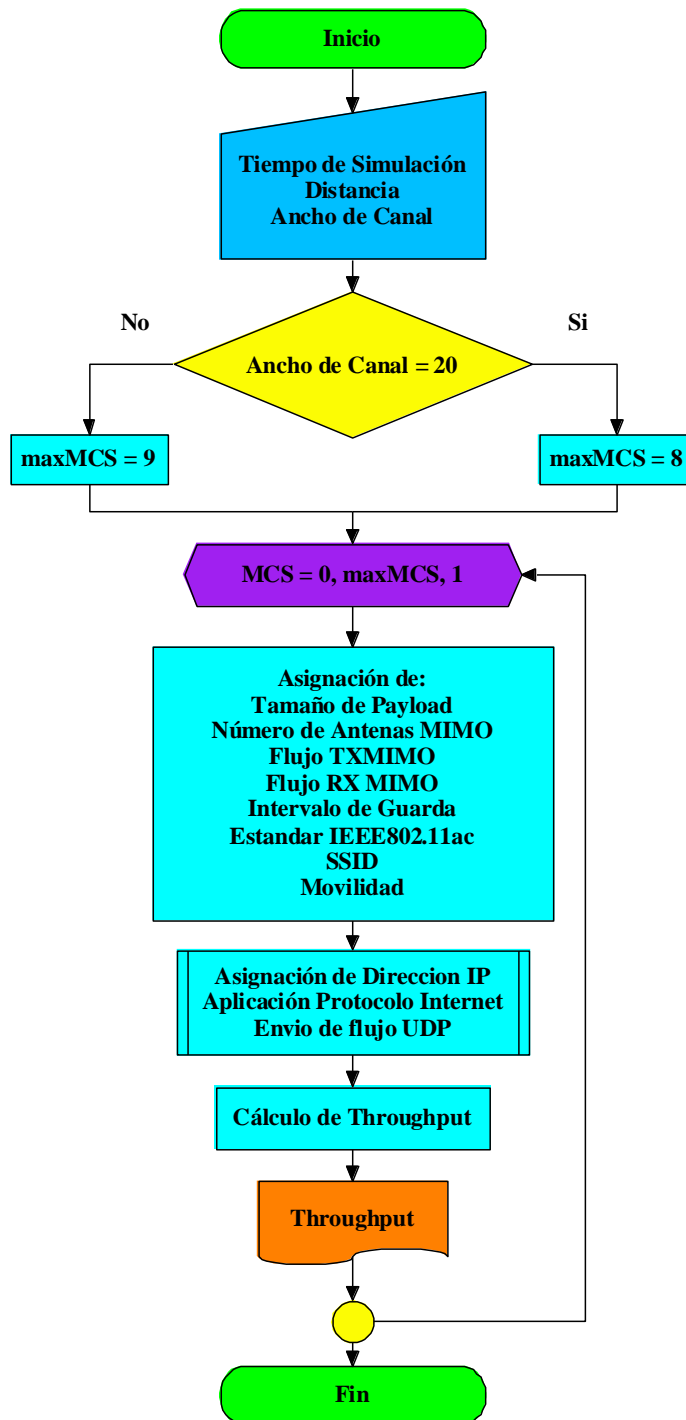


Figura 11 Diagrama de flujo en la simulación de redes IEEE802.11ac
Elaborado por: Investigador

4.6.6. Definición de Módulos o Librerías

Para la creación y utilización de los nodos por medio de una topología tanto inalámbrica como de fibra óptica en NS-3, es necesario el llamado a los módulos de movilidad puesto que proporciona facilidades para no perder la conectividad. También

se requiere de un módulo que permite generar nodos estáticos para nodos de difícil implementación por cable.

Los módulos corresponden al llamado de una gran variedad de herramientas que se pueden disponer al momento de la simulación. Existen módulos que permiten la programación tanto de dispositivos de fibra óptica, así como de redes inalámbricas, también se realiza un llamado a módulos para la aplicación de herramientas de verificación y la generación de tráfico su sintaxis es:

```
#include "ns3/core-module.h"  
#include "ns3/applications-module.h"  
#include "ns3/flow-monitor-module.h"  
#include "ns3/mobility-module.h"  
#include "ns3/wdm-module.h"  
#include "ns3/wifi-module.h"
```

4.6.7. Programación de redes de fibra óptica DWDM

Permite parametrizar el estándar que los nodos van a utilizar, en relación a la tecnología. Por medio de líneas de programación se configuran los diferentes parámetros de los componentes creados. Cuando algún parámetro no se configura, se asume un valor predeterminado.

Siguiendo las recomendaciones del creador del módulo para la simulación de redes WDM (“ns-3-wdm”), Piotr Gawłowicz en la cual determina que principalmente existen tres tipos de dispositivos para WDM disponibles:

- TxRx NetDevice
- Optical Cross Connect OXC
- Multiplexor y demultiplexor

Configurar OXC NetDevice

Para configurar OXC NetDevice en nodos se debe realizar utilizando la sintaxis:

```
NodeContainer oxcNodes;  
oxcNodes.Create (6);  
wdmHelper-> InstallOxcDevice (oxcNodes);
```

Configurar TxRx NetDevices

Para la instalación de dispositivos de transmisión y recepción se utiliza TxRx NetDevices, en donde se parametriza los diferentes canales DWDM.

```
NodeContainer txRxNodes ;
txRxNodes . Crear ( 6 );
std :: vector < uint32_t > canales ;
canales.push_back ( 1 );
canales.push_back ( 2 );
canales.push_back ( 3 );
canales.push_back ( 4 );
```

Parametros wdmHelper

Para determinar la capacidad del enlace se utiliza wdmHelper en donde se puede determinar tanto la velocidad de transmisión de los equipos, así como la potencia que tendrá el enlace.

```
wdmHelper-> SetTxRxDataRate ( "10Gbps" );
wdmHelper-> SetTxPower ( 0.01 ); // 10mW = 10dBm
wdmHelper-> InstallTxRxDevice ( txRxNodes . Get ( 0 ), channels );
```

Multiplexores y Demultiplexores

En caso de necesitar instalar dispositivos Multiplexores y Demultiplexores se puede hacer referencia a las líneas:

```
NodeContainer muxNodes;
muxNodes.Create (2);
wdmHelper-> InstallMuxDevice (muxNodes);
wdmHelper-> InstallDemuxDevice (muxNodes);
```

Interconexión de dispositivos

Para la interconexión de dispositivos TxRX al puerto Mux IN y al puerto Demux OUT a 5 metros de fibra óptica y utilizando una atenuación se utiliza:

```
wdmHelper-> SetFiberAttribute ("Atenuation", DoubleValue (0.2));  
wdmHelper-> SetFiberLength (5); // 5m  
wdmHelper-> Connect (txRxNodes.Get (0), muxNodes.Get (0));  
wdmHelper-> Connect (txRxNodes.Get (1), muxNodes.Get (0));  
Para la Coneccion del puerto Mux OUT y el puerto Demux IN a OXC:  
wdmHelper-> Connect (muxNodes.Get (0), oxcNodes.Get (0));
```

En la interconexión de equipos tipo OXC a OXC configurados a 50 km por medio de fibra óptica:

```
wdmHelper-> SetFiberLength (50000); // 50km  
wdmHelper-> Connect (oxcNodes.Get (0), oxcNodes.Get (1));
```

La programación a detalle se encuentra disponible en el anexo 1, en donde se determina los parámetros y configuraciones utilizadas para la evaluación, cabe destacar que algunos parámetros generales necesarios también son explicados en la sección siguiente por ser compatibles entre las dos tecnologías de transmisión.

La programación se la realiza bajo la consola de Linux generando un archivo de texto de extensión *.cc, el cual contiene la información relacionada a la codificación del algoritmo.

La programación correspondiente a encabezados y declaración de constantes se verifica en la sección inicial por medio de la Figura 12.

```

darius@tesisd: ~/repos/ns-3-wdm
// Topología de Red by: Darío López
//
//      T      R
//      |      |
//      =====
//      F.O. DWDM
//
#include <fstream>
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/csma-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/wdm-module.h"
#include "ns3/lpv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include <ns3/log.h>

using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("UdpClientServerExample");

void ThroughputMonitor (FlowMonitorHelper *fmhelper, Ptr<FlowMonitor> flowMon);

int
main (int argc, char *argv[])
{
    uint32_t trial = 1;
    double simulationTime = 1;
    bool useRwa = false;
    uint32_t retardo = 100;
    uint32_t Distancia = 50; //En Metros

    uint32_t payloadSize = 1448;

    RngSeedManager::SetSeed(1);
    RngSeedManager::SetRun(trial);

```

Figura 12 Programación DWDM en NS-3, sección inicial
Elaborado por: Investigador

La Figura 13 contiene información sobre la creación de la red de fibra óptica y su interconexión entre componentes ópticos.

```

darius@tesisd: ~/repos/ns-3-wdm

// Crear Nodos
NodeContainer oxcNodes;
NodeContainer txRxNodes;
oxcNodes.Create(2);
txRxNodes.Create(2);

// Instalar Movilidad
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
    CreateObject<ListPositionAllocator>();
//OXC nodes position
positionAlloc->Add(Vector(100, 100, 0));
positionAlloc->Add(Vector(300, 100, 0));

//Posicion de Nodos TXRX
positionAlloc->Add(Vector(100, 200, 0));
positionAlloc->Add(Vector(300, 200, 0));

MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
mobility.Install(oxcNodes);
mobility.Install(txRxNodes);

NS_LOG_INFO ("Create channels.");

// Crear Dispositivos e instalar en Nodos (OXC y TxRx)
uint16_t portNum = 8;
wdmHelper->InstallOxcDevice(oxcNodes, portNum);

std::vector<uint32_t> channels;
channels.push_back(1);

wdmHelper->SetTxRxDataRate("10Gbps");
wdmHelper->SetTxPower(0.01); //10mW //10dBm
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(0), channels);
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(1), channels);

// Conectar nodos TxRx a Oxc
wdmHelper->SetFiberType ("ns3::WdmFiberChannel");
wdmHelper->SetFiberAttribute ("Attenuation", DoubleValue(0.4));
wdmHelper->SetFiberDelay(MicroSeconds(retardo)); //100
wdmHelper->SetFiberLength(5); //5m

wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(0), oxcNodes.Get(0));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(1), oxcNodes.Get(1));

// Conectar nodos Oxc
wdmHelper->SetFiberLength(Distancia); //50km
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(0), oxcNodes.Get(1));

```

Figura 13 Programación DWDM en NS-3, sección red óptica
Elaborado por: Investigador

4.6.8. Programación de redes bajo el estándar IEEE802.11

Según las recomendaciones de ayuda de ns-3, para crear un dispositivo WifiNet se deben seguir los siguientes pasos:

- Definir qué tipo de capa física se utilizará, SpectrumWifiPhy o YansWifiPhy. Ya que de esto depende las configuraciones siguientes.
- Configurar el canal: Channel se encarga de definir las formas de transmitir la señal de un dispositivo a otro. Los principales parámetros de configuración son el modelo de pérdida de propagación y el de retardo de propagación.
- Configurar el WifiPhy: Este es encargado de parametrizar el envío y recepción de la señal inalámbrica.
- Parametrizar WifiMac: Está relacionado más con la arquitectura y el nivel del dispositivo.
- Creación de WifiDevice: Se define el estándar deseado (por ejemplo: 802.11b, 802.11g, 802.11a, 802.11n, 802.11ac o 802.11ax) así como el algoritmo de control de velocidad.
- Configurar la movilidad: Generalmente se requiere modelo de movilidad antes de que se pueda usar WifiNetDevice.

Para este caso se utiliza YansWifiPhy con sus configuraciones:

YansWifiChannelHelper. - Con helper se puede crear un YansWifiChannel con un modelo predeterminado de pérdidas y retardo de propagación. El valor predeterminado es un modelo de canal con un retraso de propagación igual a una constante, la velocidad de la luz y una pérdida de propagación basada en un modelo de distancia de registro predeterminado, el mismo que por defecto está configurado con una pérdida de referencia de 46.6777 dB a una distancia de referencia de 1 m que ha sido calculado utilizando el modelo de pérdida de propagación Friis a 5,15 GHz.

YansWifiPhyHelper. - La clase configura objetos para crear instancias de un YansWifiPhy y le agrega otros objetos, incluido un ErrorRateModel adicional y un puntero a MobilityModel.

La capa PHY 802.11ac puede usar intervalos de guarda OFDM largos (800 ns) o cortos (400 ns). Para configurar este parámetro, se puede utilizar la siguiente línea de código `wifiPhyHelper . Set ("ShortGuardEnabled" , BooleanValue (true));`

Para la habilitación de la tecnología MIMO, es necesario configurar la cantidad de antenas y la cantidad de flujos espaciales admitidos. Por ejemplo, este para habilitar MIMO con 2 antenas y 2 transmisiones espaciales:

```
wifiPhyHelper . Set ( "Antenas" , UIntegerValue ( 2 ) );
```

```
wifiPhyHelper . Set ( "MaxSupportedTxSpatialStreams" , UIntegerValue ( 2 ) );
```

```
wifiPhyHelper . Set ( "MaxSupportedRxSpatialStreams" , UIntegerValue ( 2 ) );
```

También es posible configurar menos transmisiones que la cantidad de antenas para beneficiarse de la ganancia de diversidad y definir diferentes capacidades MIMO para el enlace descendente y el enlace ascendente. Por ejemplo, para un nodo con 3 antenas que admite 2 flujos espaciales en sentido descendente y 1 flujo espacial en sentido ascendente:

```
wifiPhyHelper . Set ( "Antenas" , UIntegerValue ( 3 ) );
```

```
wifiPhyHelper . Set ( "MaxSupportedTxSpatialStreams" , UIntegerValue ( 2 ) );
```

```
wifiPhyHelper . Set ( "MaxSupportedRxSpatialStreams" , UIntegerValue ( 1 ) );
```

La capa PHY 802.11ac puede admitir ancho de canal 20, 40, 80 o 160 MHz.

Configuración de estándar

Los parámetros WifiPhy que están relacionados y que no se pueden configurar de forma completamente independiente, con respecto a la frecuencia y el ancho del canal del dispositivo son:

`WifiHelper :: SetStandard ()` es un método para establecer varios parámetros en MAC y Phy a valores estándar y algunos valores predeterminados. Por ejemplo, se utiliza `SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211ac)` para configurar WifiPhy al estándar deseado, IEEE802.11ac.

Configuración del ancho de canal

El ancho del canal se establece mediante el atributo `ChannelWidth` en la clase `WifiPhy`. Expresado en unidades de MHz. Por defecto, este atributo se establece en el valor 20.

Los valores permitidos son 5, 10, 20, 22, 40, 80 o 160 MHz. Se utiliza 20, 40, 80 y 160 Mhz.

WifiMacHelper

Se utiliza para configurar parámetros como el tipo de MAC. Al seleccionar 802.11ac como el estándar deseado, se habilita QoS 802.11e / WMM-estilo, alto rendimiento (HT) estilo 802.11n y soporte de muy alto rendimiento (VHT) estilo 802.11ac.

WifiNetDevices

Para crear WifiNetDevices primero se crea un WifiHelper, además se utiliza wifiPhyHelper y wifiMacHelper para instalar WifiNetDevices en un conjunto de nodos en un contenedor de nodos "c":

```
NetDeviceContainer wifiContainer = WifiHelper :: Install ( wifiPhyHelper ,  
wifiMacHelper , c );
```

Esto creará el WifiNetDevice que también incluye un WifiRemoteStationManager, un WifiMac y un WifiPhy conectado al canal correspondiente.

Configuración de movilidad

Es necesario configurar una forma de movilidad en cada nodo con dispositivo inalámbrico. Se utiliza para calcular la pérdida de propagación y el retraso de propagación.

Trafico UDP

UDP es el protocolo de datagramas no orientado a la conexión, descrito en RFC 768. Los paquetes pueden reordenarse o duplicarse antes de que lleguen. UDP genera y comprueba, sumas de comprobación para detectar errores de transmisión.

La aplicación de servidor espera paquetes UDP de entrada y usa la información transportada en su carga útil para calcular el tiempo de demora, a fin de determinar si se pierden algunos paquetes.

El parámetro "Puerto" permite definir el puerto en el que el servidor esperará los paquetes entrantes.

Ipv4AddressHelper

Una clase que facilita asignar direcciones IPv4 por medio de scripts. Esta clase es un generador de direcciones IPv4 muy simple.

Parámetros configurables:

- Red. - Dirección de Red
- Máscara. - la máscara de la dirección de red.
- Base. - Dirección opcional que contiene la dirección de la puerta de enlace. El valor predeterminado es 0.0.0.1.

Para establecer la dirección IP de red, la máscara de red y la puerta de enlace se utiliza la sintaxis:

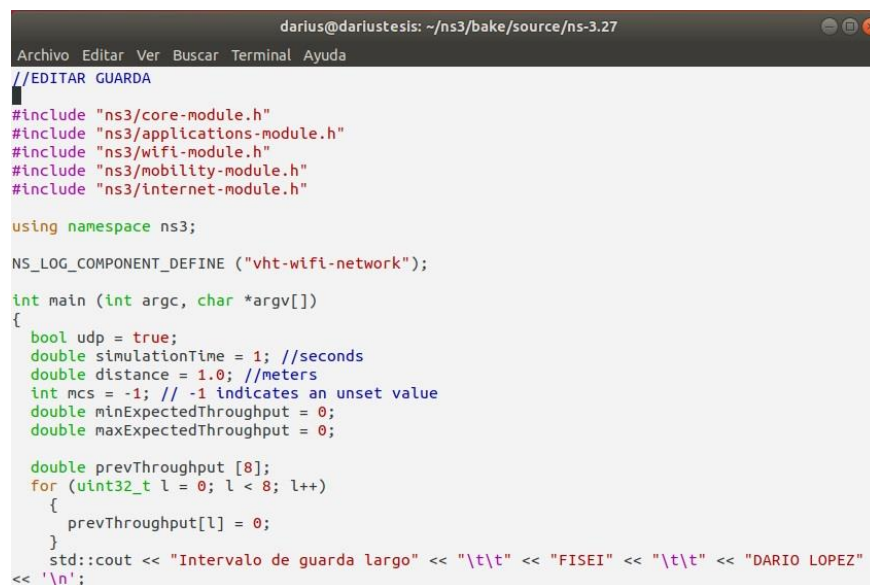
```
SetBase ("192.168.1.0", "255.255.255.0", "0.0.0.3");
```

También se puede utilizar sin puerta de enlace, en cuyo caso simplemente sería:

```
SetBase ("192.168.1.0", "255.255.255.0");
```

En el anexo I se especifica el código completo utilizado en la simulación del estándar IEEE802.11ac en redes de transporte ideales.

La figura 14 verifica parte de la codificación de una red de transporte bajo el estándar IEEE802.11ac MU-MIMO en la consola de Linux, sección inicial.



```
darius@dariustesis: ~/ns3/bake/source/ns-3.27
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
//EDITAR GUARDA
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/wifi-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"

using namespace ns3;

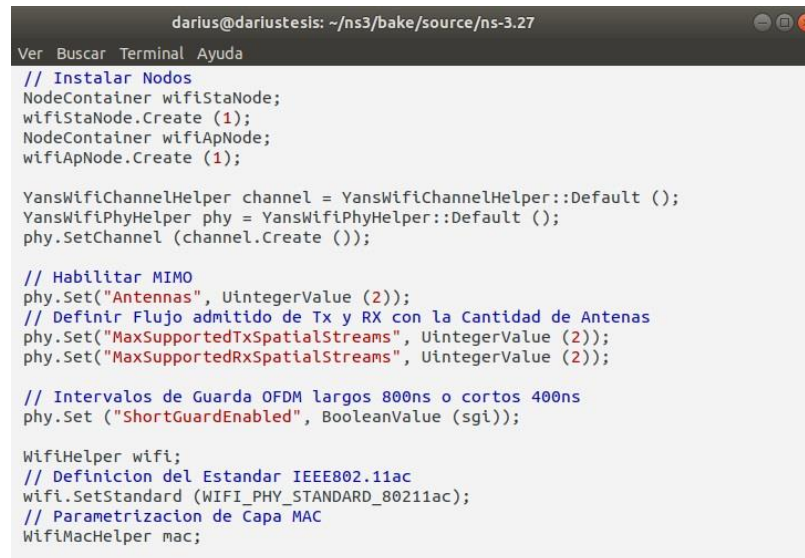
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("vht-wifi-network");

int main (int argc, char *argv[])
{
    bool udp = true;
    double simulationTime = 1; //seconds
    double distance = 1.0; //meters
    int mcs = -1; // -1 indicates an unset value
    double minExpectedThroughput = 0;
    double maxExpectedThroughput = 0;

    double prevThroughput [8];
    for (uint32_t l = 0; l < 8; l++)
    {
        prevThroughput[l] = 0;
    }
    std::cout << "Intervalo de guarda largo" << "\t\t" << "FISEI" << "\t\t" << "DARIO LOPEZ"
    << '\n';
```

Figura 14 Programación red IEEE802.11ac en NS-3, sección inicial
Elaborado por: Investigador

La figura 15 visualiza parte de la programación de la red de transporte inalámbrica con estándar IEEE802.11ac MU-MIMO la sección que permite la creación de nodos y asignación de antenas de transmisión y recepción.



```
darius@dariustesis: ~/ns3/bake/source/ns-3.27
Ver Buscar Terminal Ayuda
// Instalar Nodos
NodeContainer wifiStaNode;
wifiStaNode.Create (1);
NodeContainer wifiApNode;
wifiApNode.Create (1);

YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ();
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default ();
phy.SetChannel (channel.Create ());

// Habilitar MIMO
phy.Set("Antennas", UIntegerValue (2));
// Definir Flujo admitido de Tx y RX con la Cantidad de Antenas
phy.Set("MaxSupportedTxSpatialStreams", UIntegerValue (2));
phy.Set("MaxSupportedRxSpatialStreams", UIntegerValue (2));

// Intervalos de Guarda OFDM largos 800ns o cortos 400ns
phy.Set ("ShortGuardEnabled", BooleanValue (sgi));

WifiHelper wifi;
// Definicion del Estandar IEEE802.11ac
wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211ac);
// Parametrizacion de Capa MAC
WifiMacHelper mac;
```

Figura 15 Programación IEEE802.11ac en NS-3, sección red
Elaborado por: Investigador

4.6.9. Razón de transferencia de datos o Throughput

El Throughput representa la cantidad de tráfico recibido de forma exitosa medida en bits sobre segundos bits/s, sin incluir tramas unicast de otras MAC, tramas incompletas o duplicadas.

4.7. Interpretación de resultados en redes de Fibra Óptica

En la Tabla 7 se resume la comparativa CWDM y DWDM de la cual se obtiene como un resultado que cuando las necesidades de las redes son a corta distancia la tecnología que se mejor ajusta es CWDM, mientras tanto que para la aplicación en enlaces a través de largas distancia lo más recomendado es el uso de DWDM por ser la tecnología que permite incrementar tanto la distancia, así como el número de canales.

En la figura 16 se muestra el resultado de una de las simulaciones realizadas para obtener el Throughput desde una red con DWDM de un canal.

```

darius@tesisdl: ~/repos/ns-3-wdm
[1629/1654] cxxprogram: build/scratch/fibra02.cc.12.o -> build/scratch/fibra02
Waf: Leaving directory `~/home/darius/repos/ns-3-wdm/build'
'build' finished successfully (11.905s)
Flow ID      : 1 ; 192.168.1.1 -----> 192.168.1.2
Duration     : 0.00294088
Last Received Packet : 1.00294 Seconds
Throughput: 1129.59 Mbps
-----
Flow ID      : 1 ; 192.168.1.1 -----> 192.168.1.2
Duration     : 0.00294088
Last Received Packet : 1.00294 Seconds
Throughput: 1129.59 Mbps
-----
Flow ID      : 1 ; 192.168.1.1 -----> 192.168.1.2
Duration     : 0.00294088
Last Received Packet : 1.00294 Seconds
Throughput: 1129.59 Mbps
-----
Flow ID      : 1 ; 192.168.1.1 -----> 192.168.1.2
Duration     : 0.00294088
Last Received Packet : 1.00294 Seconds
Throughput: 1129.59 Mbps

```

Figura 16 Captura de pantalla simulación DWDM en NS-3-WDM
Elaborado por: Investigador

Como resultado de las simulaciones se registra las siguientes tablas que recopilan la información obtenida en cada kilómetro.

Tabla 10 Throughput de F.O. en relación a la distancia 1-10Km

Distancia Km	Throughput Mbps
1	1127,67
2	1125,76
3	1123,86
4	1121,96
5	1120,07
6	1118,18
7	1116,3
8	1114,43
9	1112,56
10	1110,71

Elaborado por: Investigador

En la figura 17 se puede observar la capacidad de transmisión del enlace en relación a la distancia existente entre los puntos, distancias de 1 a 10 Km

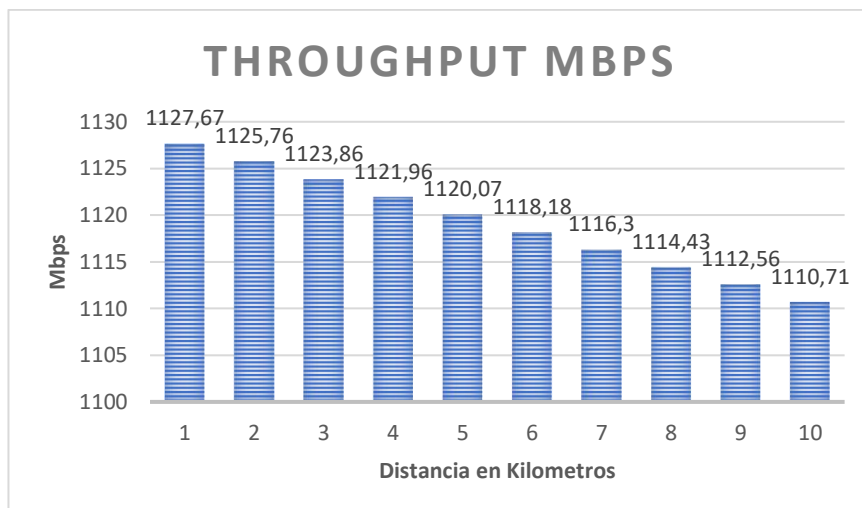


Figura 17 Throughput de F.O. en relación a la distancia 1-10Km
Elaborado por: Investigador

Uno de los factores que determina la aplicabilidad de fibra óptica en redes de transporte de datos es la distancia, esto se debe a las pérdidas propias del medio. La atenuación es más evidente a medida que se cambia la escala de evaluación.

La tabla 11 recopila información del Throughput en escalas de 10 Km hasta 50 Km.

Tabla 11 Throughput en relación a la distancia 10-50Km

Distancia Km	Throughput Mbps
10	1110,71
20	1092,44
30	1074,77
40	1057,66
50	1041,09

Elaborado por: Investigador

La figura 18 demuestra una comparativa del cambio existente a medida que la distancia crece, se evidencia que la capacidad de transmisión va decreciendo considerablemente.

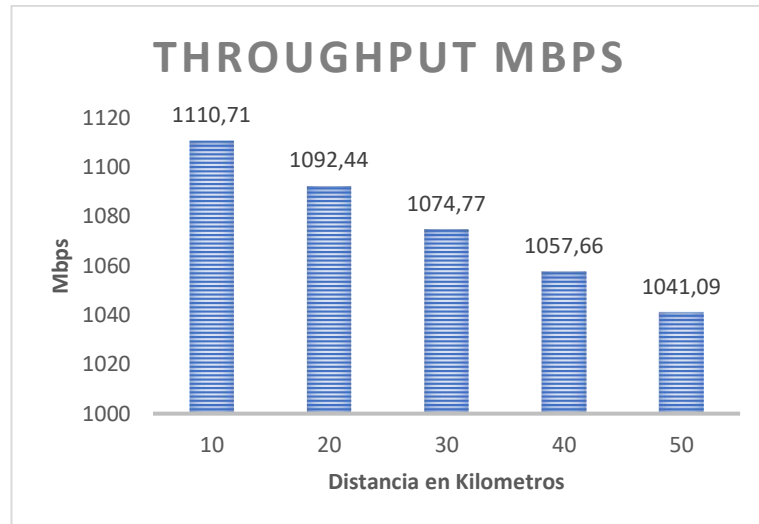


Figura 18 Throughput de F.O. en relación a la distancia 10-50Km
Elaborado por: Investigador

4.8. Interpretación de Resultados en redes Inalámbricas

Para el análisis de resultados desempeño del estándar IEEE 802.11ac en redes de transporte se lo realiza en función de la obtención de la capacidad de transmisión con relación al ancho del canal utilizado, en la evaluación se toma en cuenta además el número de antenas, estos factores determinan la cantidad de información que el enlace puede pasar desde un transmisor a un receptor en un segundo.

Se utilizan dos antenas para el enlace de subida y dos para el enlace de bajada. El tiempo de simulación parametrizado es de un segundo. Se evalúa los canales disponibles en el estándar que van desde los 20 Mhz, 40Mhz, 80 Mhz y 160 Mhz. Cada uno de ellos dependiendo del índice de modulación determinan la capacidad de transferencia disponible.

En la figura 19 se pueden ver los datos obtenidos de una de las simulaciones de redes de transporte utilizando el estándar IEEE 802.11ac.

```

darius@dariustesis: ~/ns3/bake/source/ns-3.27
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
darius@dariustesis:~/ns3/bake/source/ns-3.27$ ./waf --run scratch/Te
sisMIM005
Waf: Entering directory `/home/darius/ns3/bake/source/ns-3.27/build'
Waf: Leaving directory `/home/darius/ns3/bake/source/ns-3.27/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (15.133s)
Intervalo de guarda largo          FISEI          DARIO LOPEZ
Ancho de Canal = 160
MCS          Throughput [Mbps]
0            157.28
1            301.831
2            433.604
3            557.853
4            778.982
5            968.411
6            1051.55
7            1134.39
8            1271.34
9            1353.89

```

Figura 19 Captura de pantalla de red con el estándar IEEE802.11ac en NS-3

Como resultado de las simulaciones realizadas en el software NS-3 se han recopilado los datos siguientes:

Los datos de NS-3 obtenidos utilizando un ancho de canal de 20 Mhz se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 Throughput WLAN en el ancho de canal de 20Mhz

Canal 20 Mhz	
MCS	Throughput Mbits/s
0	17,52
1	35,39
2	53,22
3	70,99
4	106,81
5	142,10
6	159,26
7	175,67
8	208,25

Elaborado por: Investigador

En la figura 20 se puede notar la capacidad de transmisión existente en un ancho de canal de 20Mhz, el índice de modulación crece al igual que crece la capacidad.

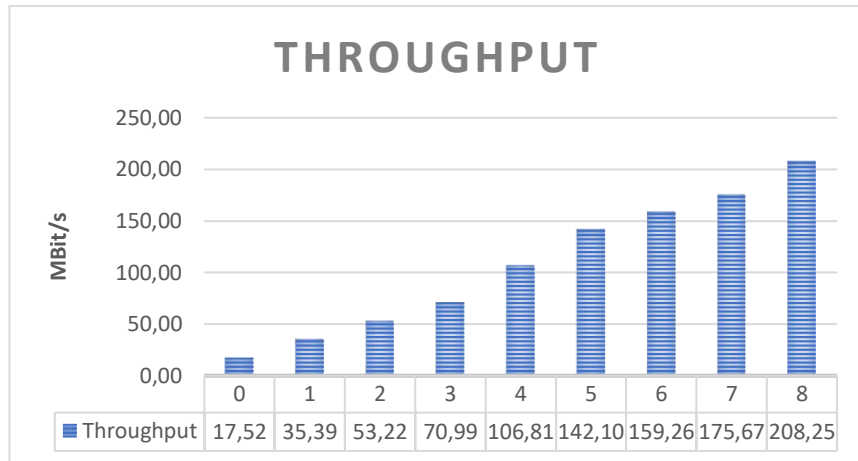


Figura 20 Throughput WLAN en un ancho de canal de 20Mhz
Elaborado por: Investigador

Al analizar el Throughput cuando el canal de comunicación es de 20 MHz, el Intervalo de guarda OFDM es largo y utilizando los MCS (Sistemas de Modulación y Codificación), se determina una tasa de transferencia mínima de 17,52 Mbits/s cuando el MCS = 0 y una máxima de 208,25 Mbits/s cuando MCS = 8. MSC 9 no es soportado.

En la Tabla 13 se resumen los datos obtenidos de NS-3 para un ancho de canal de 40 Mhz.

Tabla 13 Throughput en canal de 40Mhz

Ancho de Canal 40 Mhz	
MCS	Throughput Mbits/s
0	36,49
1	73,53
2	110,51
3	147,00
4	216,34
5	282,91
6	315,56
7	346,33
8	406,76
9	446,10

Elaborado por: Investigador

La figura 21 resume la capacidad de transmisión en relación al índice de modulación cuando se utiliza un ancho de canal de 40 Mhz.

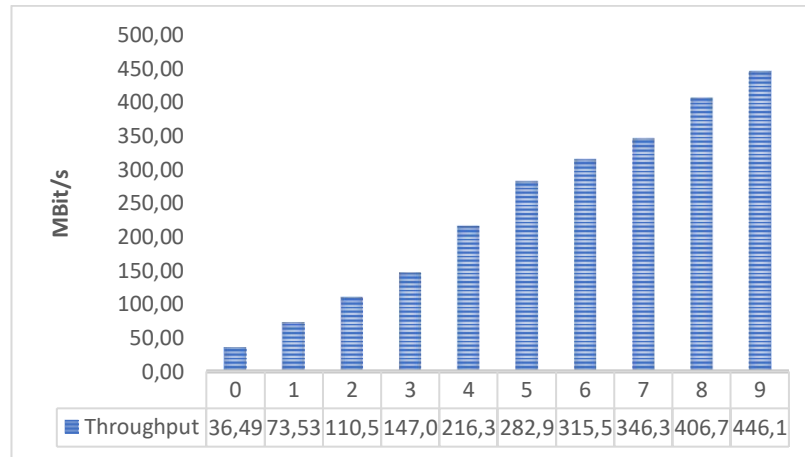


Figura 21 Throughput WLAN en un ancho de canal de 40Mhz
Elaborado por: Investigador

El Throughput cuando el ancho del canal de comunicación es de 40 MHz, el Intervalo de guarda OFDM es largo y utilizando los MCS, se determina una tasa de transferencia mínima de 36,49 Mbits/s cuando el MCS = 0 y una máxima de 446,10 Mbits/s cuando MCS = 9.

La tabla 14 contiene los resultados obtenidos de NS-3 para redes de transporte de datos en donde el ancho de Canal es de 80 Mhz.

Tabla 14 Throughput WLAN en un ancho de canal de 80Mhz

Ancho del Canal 80 Mhz	
MCS	Throughput Mbits/s
0	79,26
1	158,16
2	231,96
3	303,63
4	437,44
5	559,88
6	618,81
7	673,93
8	777,37
9	841,75

Elaborado por: Investigador

La figura 22 resume la capacidad de transmisión en relación al índice de modulación cuando se utiliza un ancho de canal de 80 Mhz.

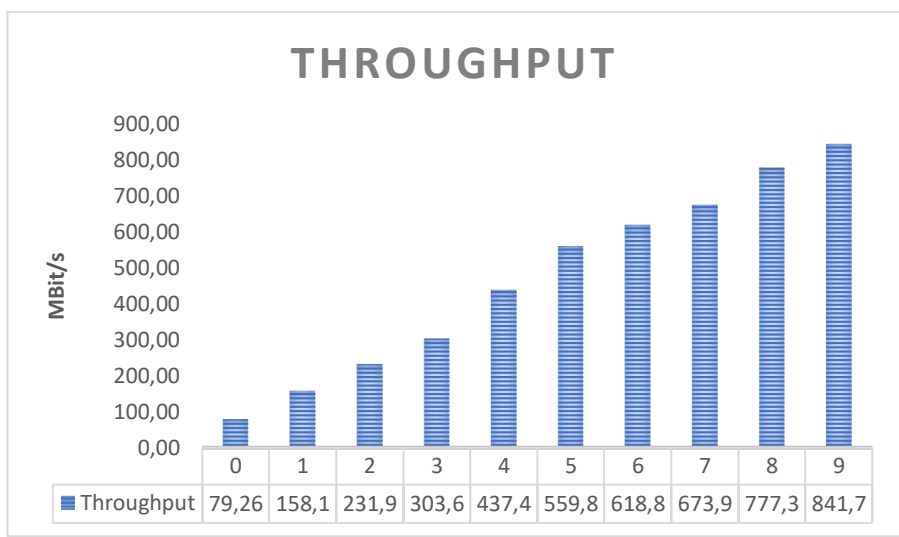


Figura 22 Throughput WLAN en un ancho de canal de 80Mhz
Elaborado por: Investigador

El Throughput cuando el canal de comunicación es de 80 MHz, el Intervalo de guarda OFDM es largo y utilizando los MCS, se determina una tasa de transferencia mínima de 79,26 Mbits/s cuando el MCS = 0 y una máxima de 841,75 Mbits/s cuando MCS = 9.

La tabla 15 refleja los datos obtenidos en la simulacion en NS-3 cuando se tiene un ancho de canal de 160 Mhz.

Tabla 15 Throughput WLAN en un ancho de canal de 160Mhz

Ancho del Canal 160 Mhz	
MCS	Throughput Mbits/s
0	157,28
1	301,83
2	433,60
3	557,85
4	778,98
5	968,41
6	1051,55
7	1134,39
8	1271,34
9	1353,89

Elaborado por: Investigador

La figura 23 resume la capacidad de transmisión en relación al índice de modulación cuando se utiliza un ancho de canal de 160 Mhz.

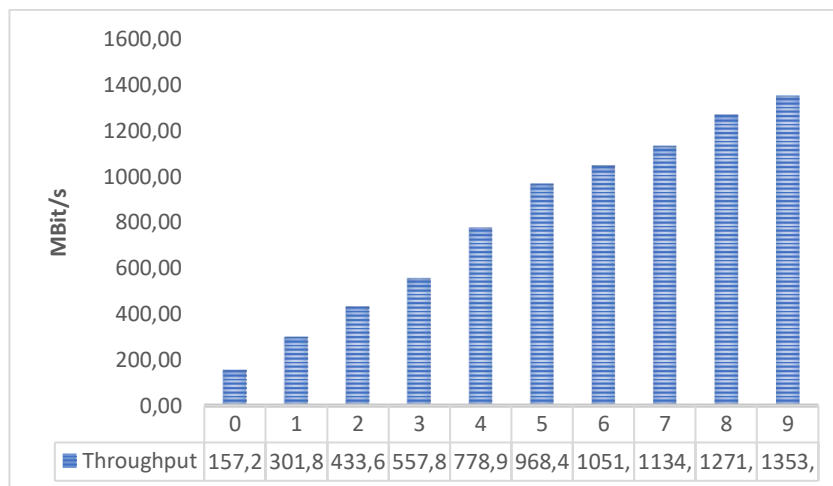


Figura 23 Throughput WLAN en un ancho de canal de 160Mhz
Elaborado por: Investigador

El Throughput cuando el canal de comunicación es de 160 MHz, el Intervalo de guarda OFDM es largo y utilizando los MCS, se determina una tasa de transferencia mínima de 157,28 Mbits/s cuando el MCS = 0 y una máxima de 1353,80 Mbits/s cuando MCS = 9.

La finalidad del estándar IEEE 802.11ac es garantizar una mayor velocidad en la red de datos y con consumo de energía menor permitiendo un mayor alcance en velocidades de transferencia de hasta 1.3 Gbps, eso lo han hecho posible por medio de características como el incremento en el ancho de canal de transmisión que ahora se incrementa hasta 160MHz, permitiendo así aún más el incremento de la velocidad de datos por cada radio. Emplea 256QAM, al mejorar el índice de modulación permite una densidad mayor en los paquetes, esto se transforma en altas tasas de transferencia de información.

La implementación de MU-MIMO permite dar soporte de transmisiones a múltiples clientes en forma simultánea, lo cual maximiza el uso de la banda radio frecuencia, y al incluir beamforming permite una mayor confiabilidad de enlace entre los puntos de acceso ya que la señal se concentra y es dirigida hacia el dispositivo mejorando la potencia y la fiabilidad de la señal entregada al receptor.

Los resultados alcanzados en la investigación por medio del simulador NS-3 al evaluar una red de Fibra Óptica utilizando un canal DWDM en relación a una red inalámbrica

utilizando el estándar IEEE802.11ac con tecnología MU-MIMO, se determina que las dos tecnologías permiten el transporte de velocidades de 1 Gbps lo cual lo hace ideal para su aplicación en redes de transporte de datos. La selección de que tecnología utilizar recaerá en el resto de los requisitos de implementación previstos, puesto que cada tecnología tiene ventajas y desventajas que deben ser tomadas en cuenta. Algunos de los parámetros más destacables a parte del ancho de banda requerido son: la distancia entre los puntos y la geografía del terreno, esto permite definir las características de operación, velocidad, confiabilidad, aplicados que se alcanzaran con las diferentes tecnologías planteadas en la investigación, permitiendo con ello optimizar recursos en la implementación de las mismas.

Es así que si la distancia a alcanzar es de pocos kilómetros y la geografía del terreno lo permite, lo ideal sería la implementación de fibra óptica, sin embargo, en casos donde la geografía no lo permite se puede optar por la implementación de una WLAN con IEEE 802.11ac. Cuando el ancho de banda no supera el 1Gbps se ponen en consideración las dos tecnologías planteadas, más sin embargo cuando se requiere de mayor velocidad de transmisión la factibilidad por el momento recae sobre fibra óptica. Cuando la distancia es el factor determinante entonces tiene mayores posibilidades el uso del estándar como medio de transporte de datos puesto que el alcance máximo es mayor a la fibra pasiva, tomando en cuenta que cada empalme y conector suponen pérdidas significantes en enlaces por medio de fibra óptica.

4.9. Cuadro de evaluación de Medios Guiados y No Guiados

Los datos recopilados en la investigación permiten generar un resumen técnico cualitativo y cuantitativo de las características más destacables de la tecnología DWDM como medio guiado, en relación al estándar IEEE 802.11ac MU-MIMO como medio no guiado, para su uso en redes de transporte de datos. Este resumen se lo evidencia en la Tabla 16.

Tabla 16 Cuadro Comparativo medios guiados y no guiados

Parámetros	Medio Guiado Fibra Óptica	Medio No Guiado WLAN 802.11ac
Velocidad de Transmisión	≈ 1Gbps en cada hilo	>1Gbps con MU-MIMO
Ancho de banda de canal	Independiente	20, 40, 80 y 160Mhz
Frecuencia o Longitud de onda de transmisión	1550nm banda C	5.8 GHz
Multiplexación Empleada	DWDM	OFDM
Codificación	No Retorno a Zero (NRZ), Retorno a Zero (RZ)	MCS
Distancias Típicas	PON de 60 Km	>100Km
Atenuación	Dependiente de la distancia e interconexiones.	Dependiente de condiciones Ambientales.
Interferencia	Muy Bajo	Alto
Estandarización	Recomendaciones ITU	Propio de IEEE
Tiempo de Duración del Enlace	Soluciones a Largo Plazo	Soluciones a Mediano Plazo
Costos de Instalación	Dependiente de la distancia	Medio Alto
Complejidad de Implementación	Media	Alta
Escalabilidad	Incrementando hilos de Fibra	Incrementando antenas en MU-MIMO
Movilidad	No	Si
Flexibilidad	Muy Baja	Alta
Seguridad	Alta	Media Baja
Complejidad de Implementación	Media	Alta

Fuente: [33], [35], [36], [38], [39], [40], [41], [43], [45]

Caso Práctico

Utilización de equipos Ubiquiti AirFiber 5 en redes de transporte.

El proyecto se llevó a cabo gracias a la colaboración de la empresa SIDEPRO CIA LTDA. que permitió el uso de dispositivos Airfiber 5 en pruebas tanto de laboratorio como su implementación en el mundo real, pudiendo comprobar la capacidad de transferencias que se pueden alcanzar en cada ambiente.

La tecnología que utiliza Airfiber es propia de Ubiquiti, más sin embargo utiliza las mejoras propias que también utiliza el estándar IEEE802.11ac, ya que utiliza una modulación superior a fin de obtener un mayor provecho del canal de comunicación posibilitando transmitir mayor información simultáneamente, utiliza la tecnología

MIMO y un mayor ancho de canal para el transporte de cantidades de datos que superan el 1 Gbps.

Por medio de las pruebas de laboratorio con baja interferencia a una distancia de 34 metros, se logra obtener la capacidad definida por el fabricante del equipo, esto se lo puede evidenciar en las siguientes figuras, en donde se puede destacar tanto la distancia del enlace, la modulación, aplicación de la tecnología MIMO, así como el ancho de canal que utiliza para alcanzar esa velocidad.

Medio del software airControl de Ubiquiti se pueden observar las características de los equipos y del enlace en el laboratorio, se visualiza en la figura 24.

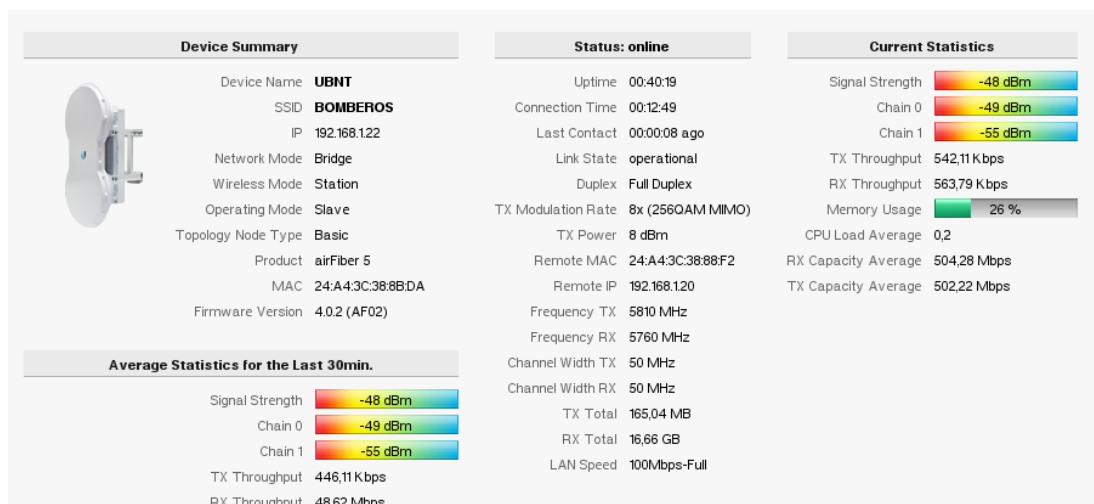


Figura 24 Visualización de AirControl en laboratorio
Elaborado por: Investigador

Además del software de control se pueden observar los parámetros configurados por medio de la dirección IP designada en los equipos.

En la figura 25 se evidencian los parámetros dentro de uno de los equipos, además se muestra la velocidad full-dúplex existente en una antena de transmisión y recepción. El otro equipo visualiza la información similar, con la diferencia que las antenas de transmisión y recepción están intercambiadas.



Figura 25 Capacidad del enlace en RX1 AirFiber 5 en laboratorio
Elaborado por: Investigador

La figura 26 muestra la velocidad full-dúplex existente en la segunda antena de transmisión y recepción.

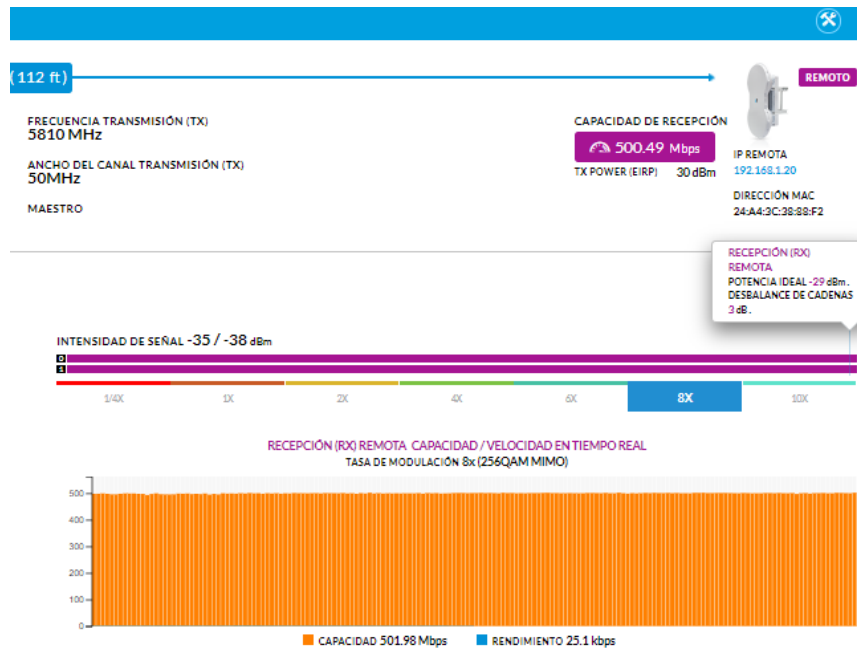


Figura 26 Capacidad del enlace en RX2 AirFiber 5 en laboratorio
Elaborado por: Investigador

Para el cálculo de la velocidad de transferencia del enlace se debe sumar las velocidades de todas las antenas, en este caso de dos antenas. En el laboratorio se

obtiene una transmisión de 1.005,05Mbps, esto corresponde a la suma de 504,56 Mbps y 500,49 que son transportados cada uno en un canal de 50MHz, más una tasa de modulación de 256QAM MIMO.

Estas tasas de transmisión son difíciles de alcanzar en el mundo real puesto que se está operando en una banda libre, esto se debe a que en la actualidad existe gran cantidad de equipos funcionando en esas bandas de frecuencia. Su implementación se lo realizó en la ciudad de Cuenca, en torres separadas a una distancia de 3,75 Kilómetros.

Por medio de la página web del fabricante y conociendo las coordenadas se puede predecir la factibilidad del enlace en parámetros como la línea de vista, esto se lo evidencia en la figura 27.

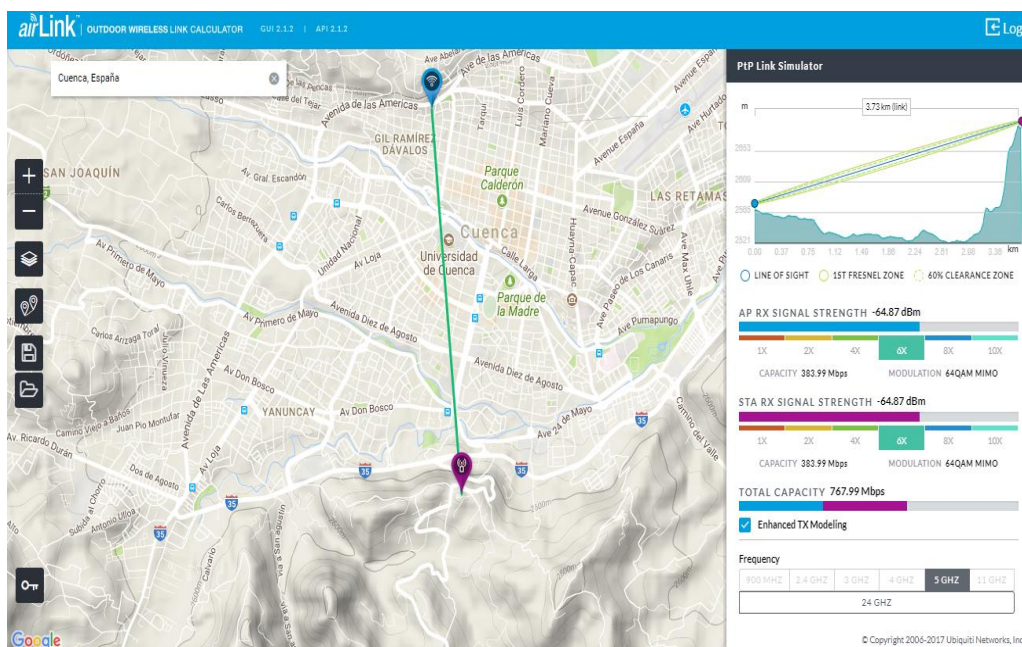


Figura 27 AirLink Visualización de las características del Enlace

Fuente: Investigador

Como se evidencia en la figura, no existe mayor obstrucción terrenal detectada, además según los cálculos realizados por AirLink determina que, en el mejor de los casos, se puede obtener una capacidad de hasta 767,99 Mbps. No se toma en cuenta las obstrucciones como árboles, edificaciones, así como de otros equipos transmitiendo en esas frecuencias.

En la figura 28 se puede evidenciar la colocación del equipo Master luego de la alineación del mismo en una torre base de 25 metros de alto.



Figura 28 Traslado de Antena Master a la Torre
Elaborado por: Investigador

La figura 29 evidencia la instalación de la estación esclavo en otro punto a una distancia de aproximadamente de 3,8 Kms de la estación central.



Figura 29 Colocación de Antena Esclavo en la Torre
Elaborado por: Investigador

Siguiendo las recomendaciones de configuración del fabricante y bajo una rigurosa tarea de alineación, se logró alcanzar una tasa de transmisión de 129,29 Mbps y 105,04 Mbps, sumando un total de 234,33 Mbps cada uno operando en ancho de canal de 20Mhz a full dúplex. Esta información se verifica por medio de la figura 30.

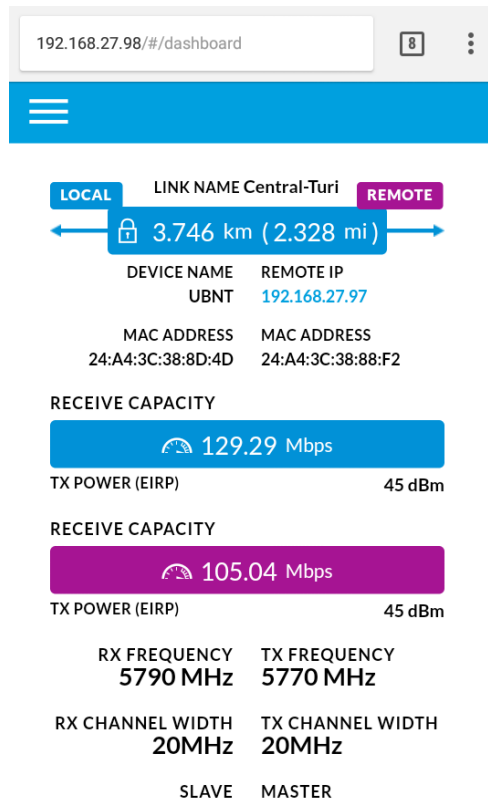


Figura 30 Capacidad real del enlace AirFiber 5
Elaborado por: Investigador

Luego de la colocación y una minuciosa tarea de apuntar y alinear, se verifican la estabilidad del enlace, comprando en primera instancia que el enlace mantenga su capacidad en los canales parametrizados y a su vez controlando para que el enlace no anule a los demás enlaces presentes en las torres, puesto que uno enlace queda como respaldo, y los demás se utilizan para comunican con otros sectores. La cantidad de enlaces existentes no permiten utilizar toda la capacidad, sin embargo, la capacidad obtenida es sumamente superior a la que se obtenía con equipos de estándar 802.11n.

Se presenta una estimación de costos en la implementación de la red de transporte de datos descrita previamente, por medio de la tabla 17.

Tabla 17 Estimación de costos para una red de transporte inalámbrica

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
1	Ubiquiti Airfiber 5	u	2	2300.00	4600.00
2	Cable UTP Cat 6 Exteriores	m	100	2.00	200.00
3	Conectores Cat6	u	4	3.50	14.00
4	Patch cord Cat 6	u	2	18.00	36.00
5	Instalación de equipos	u	2	250.00	500.00
6	Pruebas de Funcionamiento	u	2	50.00	100.00
				Total	5450.00

Elaborado por: Investigador

Requerimientos para la implementación de Fibra óptica en el caso práctico.

La red de transporte de datos implementada por medio de equipos de transmisión y recepción inalámbrica Ubiquiti AirFiber 5 ha logrado alcanzar las expectativas planteadas, sin embargo, existe otra alternativa que puede ser tomada en cuenta de requerir mayor ancho de banda, como redundancia o como un proyecto a largo plazo.

Para el análisis se toma en consideración la tecnología DWDM puesto que permite la escalabilidad resultando una ventaja a largo plazo, además de las ventajas propias de la tecnología ya descrito y resumido en la tabla 7.

Destacando que su ubicación corresponde a dos sectores de la ciudad de Cuenca separadas a una distancia lineal de 3,75 Kilómetros. Conocido las coordenadas sobre la ubicación geográfica de los dos puntos se traza la ruta que debe tener los cables de fibra óptica y a su vez calcular la distancia total, esto se lo evidencia en la figura 31.

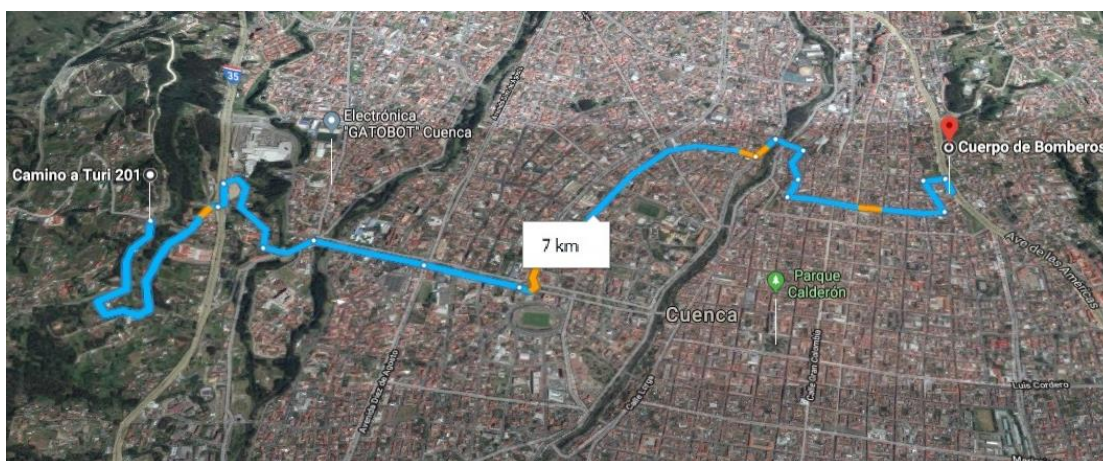


Figura 31 Longitud referencial del enlace de Fibra Óptica

Elaborado por: Investigador

Cálculos generales para el enlace de fibra óptica planteado

Los parámetros más destacables dentro del cálculos del enlace de la red de transporte por medio de fibra óptica se tiene:

Atenuación por kilómetro de fibra. - La atenuación en la fibra se obtiene del producto entre la longitud total del enlace por el coeficiente de atenuación de la fibra, siendo el coeficiente de atenuación el parámetro dependiente del fabricante y del tipo de fibra seleccionado.

La ecuación 3 representa la atenuación por kilómetro de fibra:

$$A_f = L * \alpha_L \quad (3)$$

En donde:

L : Longitud total del cable o fibra (Km)

α_L : Coeficiente de atenuación de la fibra (dB/Km)

Se toma en consideración α_L de: 0.20 dB/Km.

Del mapa se obtiene una distancia aproximada de $L = 7 \text{ Km}$

La atenuación es: $A_f = 1.4 \text{ dB}$.

Pérdidas por empalme. - Primero es necesario conocer el número de empalmes y se lo obtiene empleando la ecuación.

$$n_e = \frac{L}{L_c} + 1 \quad (4)$$

En donde:

L_c : Longitud del carrete (Carrete de 5 Km)

$$n_e = \frac{7}{5} + 1$$

$$n_e \cong 3$$

Las pérdidas generadas por los empalmes que se obtiene utilizando la ecuación:

$$A_e = n_e * \alpha_e \quad (5)$$

En donde:

α_e : Coeficiente de atenuación por empalme

Para la atenuación de empalmes por fusión (α_e) se considera un valor de 0.10 dB.

$$A_e = 0.30 \text{ dB}$$

Pérdidas por conectores. - Cada conector utilizado genera una pérdida a ser tomado en cuenta. La ecuación 6 permite calcular este valor:

$$A_c = n_c * \alpha_c \quad (5)$$

En donde:

n_c : Número de conectores

α_c : Coeficiente de atenuación por conector

Al emplear una fibra estándar de 12 hilos y utilizando conectores LC cuyo coeficiente de atenuación estándar es 0.20 dB, se obtiene:

$$A_c = 2.4 \text{ dB}$$

Margen de seguridad. - Es necesario un margen de seguridad de reservas para posibles reparaciones o adecuaciones que se puedan presentar en el cable óptico, este parámetro puede admitir valores comprendidos entre 0.1 a 0.6 dB/Km y se expresa mediante la ecuación 6:

$$Md = L * \alpha_r \quad (6)$$

Donde:

α_r : Reserva de atenuación (dB/Km)

Se toma en consideración una reserva de atenuación intermedio del recomendado, es decir un valor de 0.3 dB/Km

$$Md = 2.1 \text{ dB}$$

Atenuación Total. - La Atenuación Total se calcula por medio del uso de la ecuación:

$$A_t = A_f + A_e + A_c + M_s \quad (7)$$

Entonces:

$$A_t = 6.2 \text{ dB}$$

Potencia mínima de recepción. - Este parámetro permite determinar la confiabilidad del enlace, Es necesario tomar los datos del equipo transmisor y receptor DWDM. Para efectos de diseño se toma en consideración una potencia típica en este tipo de equipos de 4dbm. Mediante la ecuación 8 es factible obtener la potencia mínima de recepción para el enlace de datos.

$$P_t(\text{dBm}) - P_{mr}(\text{dBm}) = \sum \text{Atenuaciones (dB)} \quad (8)$$

En donde:

$P_t(\text{dBm})$: Potencia de transmisión del equipo 4dbm

$P_{mr}(\text{dBm})$: Potencia mínima de recepción

$$\sum \text{Atenuaciones (dB)} = 6.2 \text{ dB}$$

$$P_{mr} = -2.2 (\text{dBm})$$

Mediante la ecuación 8 se obtiene que la potencia de recepción mínima requerida en el equipo para el correcto funcionamiento del enlace debe ser los -2.2 dBm.

Tasa de bit errado (BER). - El BER (Bit Error Ratio), evalúa la calidad de la información recibida, es decir, relaciona el número de bits erróneos recibidos con respecto al número total de bits transmitidos en un periodo de tiempo determinado. Si el número de bits erróneos aumenta la calidad de la señal se reducirá de tal modo que será imposible descifrar el mensaje transmitido.

$$BER = \frac{\text{Numero de bits errados}}{\text{Numero de Bits Transmitidos}} \quad (9)$$

Típicamente valores de BER de 10^{-15} son característicos para redes DWDM, especialmente en redes de larga distancia. Eso significa que existe 1 bit errado de 10^{15} bits transmitidos.

Ruido Óptico. - En sistemas ópticos el ruido se conoce como OSNR y es la relación entre la potencia neta de la señal y la potencia neta del ruido. Si bien las fibras ópticas son inmunes a todo tipo de interferencias, esto no ocurre en los transmisores, receptores, amplificadores y circuitos electrónicos, por lo que la variación de la señal a ruido dependerá de estos elementos.

Matemáticamente se expresa como:

$$OSNR = 10 \log \frac{P_s}{P_n} \quad (9)$$

Donde:

$OSNR$: Relación señal a ruido óptico (dB)

P_s : Potencia neta de la señal (dB)

P_n : Potencia neta del ruido (dB) [50]

Longitud total del enlace. – Es necesario obtener la longitud total del enlace de datos planeado y para ello se toma en consideración la suma del 10% de la longitud original del enlace para reservas que se dejan cada 500 metros en caso de posibles roturas en la fibra óptica.

El 10% de 7Km es 0.7Km. Entonces se debe adicionar 700m a la longitud original, con lo cual la longitud final del enlace de datos es de 7.7Km.

Se presenta la estimación de costos necesarios para la implementación de la red de transporte de datos, los valores son referenciales y varían en función del mercado. Los costos corresponden a una red de tendido aéreo por medio de la colocación de postes en relación al máximo recomendado por CNT que es 200m.

Tabla 18 Estimación de costos para una red de transporte con fibra óptica

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
1	Cable de fibra óptica tipo ADSS de 12 hilos G.655	M	7100	0.92	6520.64
2	Manga de empalme tipo domo	U	1	145.00	145.00
3	ODF 12 hilos - terminación LC/UPC	U	2	250.00	500.00
4	Transceiver Cisco DWDM	U	4	553.64	2214.56
5	Herraje tipo A o retención	U	13	30.00	390.00
6	Accesorios de retención	U	22	21.00	462.00
7	Portareserva	U	14	28.00	392.00
8	Patch cord G.655 LC-LC 3m	U	4	35.00	140.00
9	Accesorios para bajantes	U	10	28.00	280.00
10	Poste de hormigón	U	35	90.00	3150.00
11	Tendido del cable óptico	M	7100	0.35	2485.00
12	Prueba reflectométrica de fibra óptica	H	12	40.00	480.00
13	Empalme de fibra óptica	U	12	10.00	120.00
14	Instalación manga de empalme	U	1	84.00	84.00
15	Instalación ODF	U	2	40.00	80.00
16	Montaje poste de hormigón	U	35	50.00	1750.00
				Total:	19193.20

Elaborado por: Investigador

Al realizar la estimación de costos referenciales de implementación de una red de transporte de datos por medio guiado, así como por medio no guiado, se obtiene como resultado que el costo final utilizando equipos inalámbricos es de 5450.00 USD, mientras tanto que de implementarse la misma red utilizando como medio de transmisión fibra óptica por tendido aéreo el costo es de 19193.00 USD.

4.10. Presupuesto Proyecto

El presupuesto para el desarrollo de la evaluación del estándar IEEE802.11ac con tecnología MU-MIMO en comparación al estándar de fibra óptica en redes de transporte de datos corresponden únicamente al costo de la implementación del sistema, mismo que se representa con relación a las 100 horas dedicadas a la simulación. En referencia los Salarios Mínimos Sectoriales dictados por el Ministerio Ecuatoriano del Trabajo a inicios del año 2018, el cual establece un sueldo mensual

mínimo de 1109,85 USD, para trabajadores de Investigación en actividades técnica de informática, telecomunicaciones y tecnología. Debido a que el software utilizado es de software libre lo cual implica que no se requiere rubros adicionales por uso de licencias, entonces el costo total del proyecto sería de 69,36 USD.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En la selección de la tecnología para fibra óptica que se ajuste a los requerimientos de las redes de transporte de datos se seleccionó a DWDM trabajando en 1550nm puesto que permite diseñar redes de datos de largo alcance y con una alta capacidad de ancho de banda en cada canal, además de permitir una amplia escalabilidad a largo plazo de la misma.
- En la simulación de redes de transporte utilizando DWDM en Fibra Óptica se puede determinar que al utilizar solamente un canal se pueden alcanzar velocidades de transmisión de hasta 1,2 Gbps generando así una red de altas prestaciones, mientras tanto al utilizar el estándar IEEE 802.11ac en las mismas redes se llega a una transmisión de hasta 1.1 Gbps convirtiéndolo también en una red Gigabit ideal para el transporte de grandes cantidades de información.
- En la simulación de redes de transporte de datos bajo el estándar IEEE 802.11ac con tecnología MU-MIMO se concluye que se presenta como la opción más adecuada de implementación si se toma en consideración parámetros como la dificultad de acceso geográfico o también cuando existe la necesidad de transportar información a muy largas distancias.
- Se concluye también que las velocidades obtenidas de la simulación tanto de redes de transporte con fibra óptica, así como por medio del estándar IEEE802.11ac se asemejan a los expuestos en las respectivas normativas verificando con ello la utilidad que presenta el uso de software en la evaluación y diseño y de redes de datos.

5.2. Recomendaciones

- Es recomendable verificar los últimos avances en estandarización o recomendaciones relacionados a la tecnología de transmisión de datos por medio de fibra óptica, puesto que la estandarización avanza lentamente lo cual limita el análisis de la misma sobre su aplicación en redes de transporte de datos.
- La utilización de la herramienta NS-3 como un software de simulación de protocolos de red conlleva al uso de programación estructurada lo cual hace que sea necesario conocer a detalle el uso de un lenguaje de programación estructurado como lo es el lenguaje C, las guías disponibles en internet por parte de los desarrolladores son muy poco amigables al estudiante, sin embargo existe una amplia gama de ejemplos desarrollados que permiten entender de mejor manera la forma de operación del software.
- Para una mejor selección de la tecnología a implementar se recomienda la simulación particular de la red de transporte de datos, tomando en consideración parámetros propios de cada red como geografía del terreno, distancia entre puntos, interferencias y demás factores limitantes, a fin de obtener datos exactos garantizando con ello elegir la mejor opción.
- Se recomienda el uso del sistema operativo Linux Ubuntu y la instalación de NS-3 desde el repositorio respectivo, a fin de tener disponibles todas las herramientas y aprovechar las características completas del simulador, pues solo los repositorios de NS-3 garantizan el correcto funcionamiento y contienen las últimas actualizaciones de cada paquete.
- En los siguientes avances tecnológicos se pone en manifiesto el uso de frecuencias superiores para las transmisiones de larga distancia en WLAN, esto se debe primordialmente a que a mayor frecuencia se pueden obtener ancho de canal e mayor longitud, permitiendo con ello el transporte de grandes cantidades de información, las mejoras de la IEEE 802.11ad que suponen el incremento considerable en las tasas de transmisión de datos utilizando bandas de operación de 60GHz.
- Existen además estándares inalámbricos como 802.11ax, 802.11ay, entre otras derivaciones que se encuentran en fase de investigación y que tienen como finalidad lograr las velocidades de transmisión alcanzadas actualmente por

fibra óptica, más, sin embargo, es recomendable que las tecnologías sean reguladas y controladas a fin de no interferir o ser interferido por otros enlaces, ya que con el control regulatorio es factible poder tener un canal único en una frecuencia determinada, haciendo que las modulaciones presentes en el equipo funcionen a su máxima capacidad y logrando obtener las capacidades teóricas que hasta ahora solo se lo puede obtener en laboratorio.

Bibliografía

- [1] F. Velurtas, «Universidad Nacional de La Plata,» 2009. [En línea]. Available: http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Magisters/Redes_de_Datos/Tesis/Velurtas_Facundo.pdf.
- [2] S. Reynolds, «Evolución de las Redes Ópticas,» [En línea]. Available: <http://www.revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/527/html>.
- [3] P. Marquès, «LAS TIC Y SUS APORTACIONES A LA SOCIEDAD,» 2000. [En línea]. Available: <https://docs.google.com/document/d/1rKWgUcP2MkUfrYAQm1j6pWeuSfan3xCPvEUt4vfxQJE/edit?hl=es>.
- [4] TELESTO COMUNICACIONES, «FIBRA OPTICA,» 24 10 2012. [En línea]. Available: <http://teleprocesosnc.blogspot.com/2012/10/cuadro-comparativo-de-los-medios-de.html>.
- [5] WNI México S.A., «Mantenimiento y detección de problemas en redes inalámbricas,» [En línea]. Available: http://www.wni.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=143:mantenimiento-y-deteccion-de-problemas-en-redes-inalambricas&catid=31:general&Itemid=79.
- [6] «SISTEMA COMPUTACIONAL,» 03 04 2017. [En línea]. Available: <https://sistecomplogger.wordpress.com/2017/03/11/redes-lan-alambricas-vs-redes-inalambricas/>.
- [7] L. M. Mancero Baldeon , «Escuela Politecnica del Ejercito,» 2013. [En línea]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7062/1/T-ESPE-047255.pdf>.
- [8] F. F. Alarcón Alarcón , «Universidad Politécnica Salesiana,» 01 2016. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11607/1/UPS%20-%20ST002112.pdf>.

- [9] J. Kampeas, A. Cohen y O. Gurewitz, «Rate Analysis of Distributed Multiuser MIMO Protocols for the 802.11ac,» 18 11 2016. [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7806096/>.
- [10] D. A. Ortiz Puga, «Análisis comparativo del desempeño del estándar IEEE 802.11ac respecto al IEEE 802.11n a través de simulación numérica apoyada por software,» 04 2015. [En línea]. Available: <http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10181/1/UPS%20-%20ST001829.pdf>.
- [11] F. A. Llangarí Arizo y E. J. Mejía Quishpe, «Estudio, pruebas y simulación del estándar IEEE 802.11AC basándose en MU-MIMO (MIMO- Multiuser),» 03 2016. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15072/1/CD-6883.pdf>.
- [12] B. Bellalta, J. Barcelo, D. Staehle, A. Vinel y M. Oliver, «On the Performance of Packet Aggregation in IEEE 802.11ac MU-MIMO WLANs,» 2012.
- [13] I. Singh, A. Prasad y V. Sambasiva Rao, «Study of performance of transmit beamforming and MU-MIMO mechanisms in IEEE 802.11ac WLANs,» 2017.
- [14] M. Abu-Tair y S. N. Bhatti, «IEEE 802.11ac MU-MIMO Wireless LAN Cells with Legacy Clients,» 2017.
- [15] J. Oh, J. Choi, M. Song y H.-D. Choi, «Performance comparison of cooperative downlink transmission schemes in IEEE 802.11ac: Interference alignment vs. MU-MIMO with TDMA,» 2014.
- [16] K. Kosek-Szott y G. Cuka, «Consequences of Performing DL MU-MIMO Transmissions with TXOP Sharing for QoS Provisioning in IEEE 802.11ac Networks,» 2017.
- [17] J. M. Huidobro Moya, Redes y servicios de telecomunicaciones, Madrid: Paraninfo, 2006.
- [18] «Las Redes de Transporte,» 15 09 2011. [En línea]. Available: <https://filotecnologica.wordpress.com/2011/09/15/las-redes-de-transporte/>.
- [19] M. Santos González, «La última milla,» Redes Telemáticas, 05 11 2012. [En línea]. Available: <http://redestelematicas.com/la-ultima-milla/>.
- [20] M. Santos González, Diseño de redes telemáticas, España: RA-MA S.A., 2014.

- [21] I. A. Vargas, *Sistemas de fibra optica*, Lima: Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica.
- [22] «FUNDAMENTOS DE FIBRA ÓPTICA,» [En línea]. Available: http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/optopdf7_archivos/unidad7tema2.pdf.
- [23] J. A. Mora Zavala, «scribd,» 17 08 2014. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/237000969/Fibra-optica>.
- [24] C. A. Geronimo Mayor, *Manual de comunicaciones por fibras ópticas*, Lima.
- [25] L. Milla León, «Comunicaciones Ópticas,» [En línea]. Available: <http://www.usmp.edu.pe/vision2011/exposiciones/21.%20Comunicaciones.pdf>. [Último acceso: 2018 03 25].
- [26] La Agencia Estatal de Seguridad Aérea España, «Módulo 5. Técnicas digitales. Fibra óptica.,» [En línea]. Available: http://www.seguridadaerea.gob.es/media/3785415/modulo05_cap10.pdf.
- [27] TelecOcable, «El Blog de TelecOcable,» [En línea]. Available: <https://www.telecocable.com/blog/ventajas-desventajas-la-fibra-optica/1458>. [Último acceso: 2018 03 25].
- [28] «Fibra - Monomodo o Multimodo,» [En línea]. Available: <http://www.infoplcn.net/blogs-automatizacion/item/104568-fibra-monomodo-multimodo>.
- [29] A. Carballar, «Departamento de Ingeniería Electrónica Universidad de Sevilla,» 02 2002. [En línea]. Available: http://www.dinel.us.es/util/bajar.php?file=eJxTUo0rqZjffVr_5PnTPn49_ufO67IaTjL-_Dmo-ytX0KWkLuVmhtMsPKlcMHh0Ecg,&x=21&y=12&r=0.
- [30] «Telecomunicaciones TICS,» [En línea]. Available: <https://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-6/>. [Último acceso: 2018 03 25].
- [31] «Ventanas de Operacion,» [En línea]. Available: https://edoc.tips/download/ventanas-de-operacion_pdf. [Último acceso: 25 03 2018].

- [32] J. Ferrer Martí, «Simulador para redes ópticas semitransparentes,» 08 02 2008. [En línea]. Available: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4741/Article.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [33] C. García Morales, «DWDM y CWDM,» 2012. [En línea]. Available: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>.
- [34] G. Galarza, «COMUNICACIONES OPTICAS DE LARGO ALCANCE EN LINEAS DE ALTA TENSION,» [En línea]. Available: [http://www02.abb.com/db/db0003/db004333.nsf/ca7e93ab03030d22c12571380039e8fc/ee59e824c5810319c12576d500445090/\\$FILE/AR_41.pdf](http://www02.abb.com/db/db0003/db004333.nsf/ca7e93ab03030d22c12571380039e8fc/ee59e824c5810319c12576d500445090/$FILE/AR_41.pdf).
- [35] «Propiedades de transmisión de la fibra óptica,» [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>. [Último acceso: 25 03 2018].
- [36] O. F. Prado Esparza, «Normas de las fibras opticas monomodo G652, G655,G657 y las multimodo G651,» 27 03 2017. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/348783092/Normas-de-Las-Fibras-Opticas-Mono-Modo-G652-FINAL>.
- [37] G. Letelier Buscaglia, «Diseño y configuración de un backhaul inalámbrico para largas distancias y alto rendimiento,» [En línea]. Available: https://www.codelco.com/flipbook/codelcodigital5/pdfs/10_SU_9_TRANSWORLD.pdf. [Último acceso: 25 03 2018].
- [38] M. F. Florez Diaz, «Redes Inalambricas,» [En línea]. Available: <http://redessincableado.blogspot.com/p/ventajas-las-redes-wifi-poseen-una.html>.
- [39] «WIRELESS IEEE 802.11 : VENTAJAS Y DESVENTAJAS,» [En línea]. Available: <https://wizbyte.wordpress.com/2014/07/05/wireless-ieee-802-11-ventajas-y-desventajas/>.
- [40] A. Escudero Pascual, «Estándares en Tecnologías Inalámbricas,» 10 2007. [En línea]. Available: http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/02_es_estandares-inalambricos_guia_v02.pdf.

- [41] J. Salazar. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf.
- [42] R. Esquivel Trinidad, «Técnicas de modulación,» 11 2011. [En línea]. Available: <http://tecomunicacion.webcindario.com/Archivos/Unidad%20II.pdf>.
- [43] J. J. Anguís Horno, «Tecnología MIMO,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/g.+Cap%C3%ADtulo+3++Tecnolog%C3%ADa+MIMO.pdf+>.
- [44] «Introducción a 802.11ac,» [En línea]. Available: http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch01.html#ac_product_development_plans.
- [45] «La PHY,» [En línea]. Available: http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch02.html#mandatory_phy_features.
- [46] «ns-3 Tutorial,» [En línea]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.14/tutorial-pt-br/singlehtml/index.html>.
- [47] «Un simulador de red de eventos discretos,» [En línea]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/tutorial/html/introduction.html>.
- [48] «QUÉ ES NS-3,» [En línea]. Available: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>.
- [49] «TECNOLOGÍAS CLAVE en NS-3,» [En línea]. Available: <https://www.nsnam.org/overview/key-technologies/>.
- [50] G. C. Yacchirema Lumbi, «SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE ALTA DISPONIBILIDAD PARA LA,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2016.
- [51] WNI MÉXICO S.A., «El nuevo estándar inalámbrico 802.11ac,» [En línea]. Available: http://www.wni.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=75:80211ac&catid=31:general&Itemid=79.
- [52] «La fibra óptica,» [En línea]. Available: <http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/fisico/fibra.html>.

- [53] «Fundamentos de las Fibras Ópticas,» Blog de Fibra Óptica y Redes del CIFP Tartanga, [En línea]. Available: <http://fibroptica.blog.tartanga.eus/fundamentos-de-las-fibras-opticas/>.
- [54] G. A. Rosero Carmona, «Diseño de una red de transporte de telecomunicaciones para la costa occidental del lago de maracaibo,» 03 2008. [En línea]. Available: <http://159.90.80.55/tesis/000140630.pdf>.
- [55] «La PHY,» [En línea]. Available: http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch02.html#radio_channels_in_ac.
- [56] «OptySystem,» [En línea]. Available: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/OptySystem>.

Anexos

Anexo I

Programación de red de Fibra Óptica en NS3

Declaración de Librerías o Módulos

```
#include <fstream>
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/csma-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/wdm-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include <ns3/log.h>
```

Definición de Componente

```
using namespace ns3;
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("UdpClientServerExample");
```

Función Principal

```
int main (int argc, char *argv[])
{
```

Declaración de Variables

```
uint32_t trial = 1;
double simulationTime = 1;
bool useRwa = false;
uint32_t retardo = 100;
uint32_t Distancia = 500000; //En Metros
uint32_t payloadSize = 1448;
```

Creación de la red Óptica

```
Ptr<WdmHelper> wdmHelper = CreateObject<WdmHelper>();
Ptr<WdmRwaHelper> wdmRwaHelper = CreateObject<WdmRwaHelper>();
wdmHelper->SetRwaHelper(wdmRwaHelper);
NodeContainer oxcNodes;
NodeContainer txRxNodes;
oxcNodes.Create(2);
txRxNodes.Create(2);
```

Parámetros de Movilidad

```
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
CreateObject<ListPositionAllocator>();
//OXC nodes Position
positionAlloc->Add(Vector(100, 100, 0));
positionAlloc->Add(Vector(300, 100, 0));
//TXRX nodes position
positionAlloc->Add(Vector(100, 200, 0));
positionAlloc->Add(Vector(300, 200, 0));
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
mobility.Install(oxcNodes);
mobility.Install(txRxNodes);
```

Creación de canales y determinación de parámetros de Fibra Óptica

```
// Create Devices and install them in the Nodes (OXC and TxRx)
uint16_t portNum = 8;
wdmHelper->InstallOxcDevice(oxcNodes, portNum);

std::vector<uint32_t> channels;
channels.push_back(1);
wdmHelper->SetTxRxDataRate("10Gbps");
wdmHelper->SetTxPower(0.01); //10mW //10dBm
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(0), channels);
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(1), channels);
```

Interconexión de componentes Ópticos para formar la red

```
// Connect TxRxNode to OxcNode
wdmHelper->SetFiberType ("ns3::WdmFiberChannel");
wdmHelper->SetFiberAttribute ("Attenuation", DoubleValue(0.4));
wdmHelper->SetFiberDelay(MicroSeconds(retardo)); //100 Darius
wdmHelper->SetFiberLength(5); //5m
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(0), oxcNodes.Get(0));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(1), oxcNodes.Get(1));

// Connect OxcNode to OxcNode
wdmHelper->SetFiberLength(Distancia); //50km
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(0), oxcNodes.Get(1));
// Install optical paths in OXC Nodes
NetDeviceContainer d0d1;
wdmHelper->SetSwitchingRule(oxcNodes.Get(0), 2, 1, 1, 1);
wdmHelper->SetSwitchingRule(oxcNodes.Get(1), 2, 1, 1, 1);
d0d1.Add(txRxNodes.Get(0)->GetDevice(0));
d0d1.Add(txRxNodes.Get(1)->GetDevice(0)); }
```

Asignación de Direcciones IP

```
InternetStackHelper stack;  
stack.Install(txRxNodes);  
  
//Assign IP addresses  
Ipv4AddressHelper address;  
address.SetBase("192.168.1.0", "255.255.255.0");  
Ipv4InterfaceContainer i0i1 = address.Assign(d0d1);
```

Creación de Aplicación UDP

```
uint16_t port = 9;  
UdpServerHelper server (port);  
ApplicationContainer serverApps;  
serverApps = server.Install (txRxNodes.Get (1));  
serverApps.Start (Seconds (1.0));  
serverApps.Stop (Seconds (simulationTime + 1));  
UdpClientHelper client (i0i1.GetAddress (1), port);  
client.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (295u));  
client.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.00001)));  
client.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (payloadSize));  
ApplicationContainer clientApps = client.Install (txRxNodes.Get (0));  
clientApps.Start (Seconds (1.0));  
clientApps.Stop (Seconds (simulationTime + 1));  
Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables();
```

Monitor de Flujo de datos

```
FlowMonitorHelper fmHelper;  
Ptr<FlowMonitor> allMon = fmHelper.InstallAll();  
Simulator::Schedule(Seconds(3),&ThroughputMonitor,&fmHelper, allMon);  
NS_LOG_INFO ("Run Simulation.");  
Simulator::Stop(Seconds(10.1));  
Simulator::Run ();  
ThroughputMonitor(&fmHelper, allMon);  
Simulator::Destroy ();
```

Determinación de Throughput y visualización en pantalla

```
void ThroughputMonitor (FlowMonitorHelper *fmhelper, Ptr<FlowMonitor>  
flowMon)  
{  
std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> flowStats = flowMon->GetFlowStats();  
Ptr<Ipv4FlowClassifier> classing = DynamicCast<Ipv4FlowClassifier> (fmhelper->  
>GetClassifier());  
for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator stats =  
flowStats.begin (); stats != flowStats.end (); ++stats)  
{  
Ipv4FlowClassifier::FiveTuple fiveTuple = classing->FindFlow (stats->first);  
std::cout<<"Flow ID : " << stats->first <<" "; <<  
fiveTuple.sourceAddress <<" ----> " <<fiveTuple.destinationAddress<<std::endl;
```

```

//std::cout<<"Tx Packets = " << stats->second.txPackets<<std::endl;
//std::cout<<"Rx Packets = " << stats->second.rxPackets<<std::endl;
std::cout<<"Duration          : " << stats->second.timeLastRxPacket.GetSeconds()-
stats->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds()<<std::endl;
std::cout<<"Last Received Packet  : " << stats-
>second.timeLastRxPacket.GetSeconds()<<" Seconds"<<std::endl;
std::cout<<"Throughput: " << stats->second.rxBytes * 8.0 / (stats-
>second.timeLastRxPacket.GetSeconds()-stats-
>second.timeFirstTxPacket.GetSeconds())/1024/1024 << " Mbps"<<std::endl;
std::cout<<"-----"
"<<std::endl;

```


Anexo II

Programación de red IEEE802.11ac en NS3

Declaración de Librerías o Módulos

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/wifi-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
```

Definición de Componente

```
using namespace ns3;
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("vht-wifi-network");
```

Función Principal

```
int main (int argc, char *argv[])
```

Declaración e inicialización de Variables

```
bool udp = true;
double simulationTime = 1; //seconds
double distance = 1.0; //meters
int mcs = -1; // -1 indicates an unset value
for (uint32_t l = 0; l < 8; l++)
int minMcs = 0;
int maxMcs = 9;
payloadSize = 1088; //bytes
```

Visualización externa de mensajes descriptivos

```
std::cout << "Intervalo de guarda largo" << "\t\t" << "FISEI" << "\t\t" << "DARIO
LOPEZ" << "\n";
// std::cout << "MCS" << "\t\t" << "Ancho de Canal" << "\t\t" << "Throughput
[Mbps]" << "\n";
```

Cálculo de Throughput para MCS hasta 8 o 9

```
for (int mcs = minMcs; mcs <= maxMcs; mcs++)
{
uint8_t index = 0;
double previous = 0;
int channelWidth = 20;
```

Control de MCS para canales de 20 MHz

```
if (mcs == 9 && channelWidth == 20)
{
channelWidth *= 2;
continue;
}
```

Añadir Intervalo de Guarda largo 800ns

```
int sgi = 0;
```

Creación de Nodos Wireless

```
NodeContainer wifiStaNode;  
wifiStaNode.Create (1);  
NodeContainer wifiApNode;  
wifiApNode.Create (1);
```

Parametrización de canales

```
YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ();  
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default ();  
phy.SetChannel (channel.Create ());
```

Habilitación de MIMO

```
phy.Set("Antennas", UIntegerValue (2));  
// Definir Flujo admitido de Tx y RX con la Cantidad de Antenas  
phy.Set("MaxSupportedTxSpatialStreams", UIntegerValue (2));  
phy.Set("MaxSupportedRxSpatialStreams", UIntegerValue (2));
```

Intervalos de Guarda OFDM largos 800ns o cortos 400ns

```
phy.Set ("ShortGuardEnabled", BooleanValue (sgi));
```

Definición del Estándar IEEE802.11ac

```
wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211ac);
```

Parametrización de Capa MAC

```
WifiMacHelper mac;  
std::ostringstream oss;  
oss << "VhtMcs" << mcs;  
wifi.SetRemoteStationManager ("ns3::ConstantRateWifiManager", "DataMode",  
StringValue (oss.str ()), "ControlMode", StringValue (oss.str ()));
```

Creación de la Red Wireless

```
Ssid ssid = Ssid ("ns3-80211ac");  
mac.SetType ("ns3::StaWifiMac", "Ssid", SsidValue (ssid));  
NetDeviceContainer staDevice;  
staDevice = wifi.Install (phy, mac, wifiStaNode);  
mac.SetType ("ns3::ApWifiMac", "EnableBeaconJitter", BooleanValue (false),  
"Ssid", SsidValue (ssid));  
NetDeviceContainer apDevice;  
apDevice = wifi.Install (phy, mac, wifiApNode);  
Config::Set ("/NodeList/*/DeviceList*/$ns3::WifiNetDevice/Phy/ChannelWidth",  
UIntegerValue (channelWidth));
```

Definir la movilidad

```
MobilityHelper mobility;  
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc = CreateObject<ListPositionAllocator> ();  
positionAlloc->Add (Vector (0.0, 0.0, 0.0));  
positionAlloc->Add (Vector (distance, 0.0, 0.0));
```

```

mobility.SetPositionAllocator (positionAlloc);
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (wifiApNode);
mobility.Install (wifiStaNode);

```

Definir la Aplicación de Internet

```

InternetStackHelper stack;
stack.Install (wifiApNode);
stack.Install (wifiStaNode);

```

Definir direcciones IP

```

Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase ("192.168.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer staNodeInterface;
Ipv4InterfaceContainer apNodeInterface;
staNodeInterface = address.Assign (staDevice);
apNodeInterface = address.Assign (apDevice);

```

Definir Aplicación UDP

```

ApplicationContainer serverApp;
uint32_t port = 9;
UdpServerHelper server (port);
serverApp = server.Install (wifiStaNode.Get (0));
serverApp.Start (Seconds (0.0));
serverApp.Stop (Seconds (simulationTime + 1));
Time interPacketInterval = Seconds (0.00001);
UdpClientHelper client (staNodeInterface.GetAddress (0), port);
client.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (4294967295u));
client.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
client.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (payloadSize));
ApplicationContainer clientApp = client.Install (wifiApNode.Get (0));
clientApp.Start (Seconds (0.5));
clientApp.Stop (Seconds (simulationTime + 1));

```

Parámetros de Simulación

```

Simulator::Stop (Seconds (simulationTime + 1));
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();

```

Cálculo y visualización del Throughput

```

uint64_t rxBytes = 0;
rxBytes = payloadSize * DynamicCast<UdpServer> (serverApp.Get (0))-
>GetReceived ();
double throughput = (rxBytes * 8) / (simulationTime * 1000000.0); //Mbit/s
std::cout << mcs << "\t\t" << "\t\t\t" << throughput << std::endl;

```

Anexo III

Información general de AirFiber 5

AirFiber PtP 5GHz, Largo Alcance 100Km+ y Máxima Velocidad 1Gbps.

Es un dispositivo para enlaces Punto a Punto de Ubiquiti que opera en la banda de 5GHz, alcanza velocidades de más de 1 Gbps, procesa más de 1 millón de paquetes por segundo e introduce la nueva tecnología eXtended Range (xRT) para proporcionar un largo alcance de más de 100 Km.

Procesamiento Superior

Ubiquiti Networks introduce INVICTUS, su propio procesador. La velocidad, la potencia y la eficiencia de este circuito integrado mejora el rendimiento de la AirFiber AF-5.

Uso Eficiente de la Banda de 5 GHz

Controla la potencia de transmisión con exactitud en relación con el límite de la banda. El nivel de potencia se ajusta automáticamente para optimizar el rendimiento cerca de los límites de la banda, esto permite elegir la parte de la banda con la menor interferencia.

Enlaces de largo alcance

La nueva tecnología xRT desarrollada para la AF-5 utiliza un innovador esquema adaptable de codificación multi-canal para mejorar el rendimiento del transceptor, lo que permite un largo alcance del enlace y una mejor utilización del espectro. Manteniéndose dentro de las normas regulatorias. Con todo esto se pueden lograr enlaces a distancias que van desde 10m hasta más de 100 km.

Arquitectura Innovadora Antena-Dual

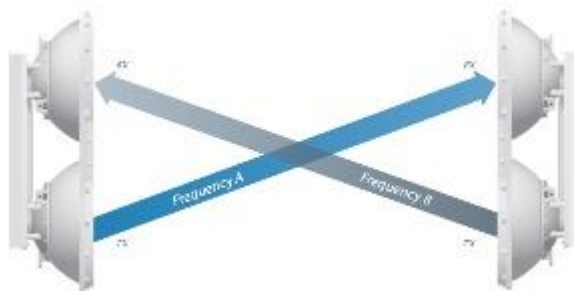
AirFiber cuenta con un sistema de antenas MIMO 2x2 doble independiente de alta ganancia, estar separadas la antena de Transmisión (Tx) y Recepción (Rx) ayuda a tener enlaces de largo alcance, mediante la eliminación de las pérdidas adicionales de RF causadas por los duplexores o switches utilizados en sistemas de antenas comunes de Tx/Rx.

Transmisión y Recepción de Datos Síncrona

Los estándares inalámbricos convencionales permiten que haya latencia por tener que recibir un paquete antes de transmitir otro. AirFiber puede transmitir datos de forma síncrona sin ningún tiempo de espera.

Además, opera en los modos tradicionales TDD (Time Division Duplexing) y FDD (Frequency Division Duplexing) y adicionalmente cuenta con la propiedad HDD (Hybrid Division Duplexing), que proporciona un gran avance en el alcance y el rendimiento eficiencia espectral.

También se utiliza la tecnología HDD para calcular el retardo de propagación y saber cuándo cada airFiber puede transmitir y recibir, por lo que envían paquetes en la sincronización precisa. De esta manera el fenómeno de latencia se elimina virtualmente.



Pantalla para Alineación

La Pantalla de Radio Alineación (RAD) hace que sea más rápido y más fácil su instalación. Los indicadores de intensidad de señal duales muestran los niveles de la señal actual en las AirFiber locales y remotas en tiempo real.

La completa gama de indicadores de estado de la airFiber mostrará lo siguiente:

- Estado de sincronización GPS.
- Modo maestro / esclavo.
- Estado del enlace de RF.
- Advertencia de sobrecarga de RF.
- El modo de modulación actual.
- Actividad y velocidad del enlace.
- AirFiber LCD

Anexo IV

Especificaciones Técnicas Airfiber

airFiber AF-5/AF-5U	
Operating Frequency AF-5 FCC 15.247, 15.407, IC RSS 210 ETSI EN 301 893, EN 302 502 Other Regions AF-5U FCC 15.247, IC RSS 21 ETSI EN 302 502 Other Regions	5470 - 5600 MHz, 5650 - 5850 MHz 5470 - 5875 MHz 5470 - 5950 MHz 5725 - 5850 MHz 5725 - 5875 MHz 5725 - 6200 MHz
Dimensions	938.4 x 468.4 x 281.4 mm (36.94 x 18.44 x 11.08 in)
Weight Mount Not Included Mount Included	11.5 kg (25.35 lb) 16 kg (35.27 lb)
Max. Power Consumption	40 W
Power Supply	50V, 1.2A PoE GigE Adapter (Included)
Power Method	Passive Power over Ethernet (42-58VDC)
Certifications	CE, FCC, IC
Mounting	Pole Mount Kit (Included)
Wind Loading	863 N @ 200 km/hr (194 lbf @ 125 mph)
Wind Survivability	200 km/hr (125 mph)
Operating Temperature	-40 to 55°C (-40 to 131°F)
LEDs	(12) Status LEDs: Data Port Link/Activity Data Port Speed Management Port Link/Activity Management Port Speed GPS Synchronization Master/Slave Link Status Modulation Mode 0.25x to 4x, 6x, 8x, 10x (Unlabeled), Overload Remote and Local Displays (Calibrated Signal Strength)
Interface	
Data Port	(1) 10/100/1000 Ethernet Port
Management Port	(1) 10/100 Ethernet Port
Auxiliary Port	(1) RJ-12, Alignment Tone Port

System	
Maximum Throughput	1.2+ Gbps
Maximum Range	100+ km (62.14+ mi) (Dependent on Regulatory Region)
Packets per Second	1+ Million
Encryption	128-Bit AES
Forward Error Correction	164/205
Cyclic Prefix	1/16 Fixed
Uplink/Downlink Ratio	50% Fixed
Radio Frame Synchronization	GPS
Dynamic Frequency Selection AF-5	CE, FCC/IC

airFiber AF-5/AF-5U Receive Sensitivity							
Spatial Streams	Modulation	Sensitivity (10 MHz)	Sensitivity (20 MHz)	Sensitivity (40 MHz)	Sensitivity (50 MHz)	FDD Capacity*	TDD Capacity*
10x	1024QAM	-64 dBm	-61 dBm	-59 dBm	-58 dBm	1280 Mbps	640 Mbps
8x	256QAM	-70 dBm	-67 dBm	-65 dBm	-64 dBm	1024 Mbps	512 Mbps
6x	64QAM	-77 dBm	-74 dBm	-72 dBm	-71 dBm	768 Mbps	384 Mbps
4x	16QAM MIMO	-84 dBm	-81 dBm	-79 dBm	-78 dBm	512 Mbps	256 Mbps
2x	QPSK MIMO	-90 dBm	-87 dBm	-85 dBm	-84 dBm	256 Mbps	128 Mbps
1x	½ Rate QPSK xRT	-93 dBm	-90 dBm	-88 dBm	-87 dBm	128 Mbps	64 Mbps
¼x	¼ Rate QPSK xRT	-95 dBm	-93 dBm	-92 dBm	-91 dBm	32 Mbps	16 Mbps

airFiber AF-5/AF-5U Radio Frequency	
GPS	GPS Clock Synchronization
Transceiver	
EIRP	~50 dBm (Dependent on Regulatory Region and Frequency Band)
Frequency Accuracy	± 2.5 ppm without GPS Synchronization ± 0.2 ppm with GPS Synchronization
Channel Bandwidth	10/20/30/40/50 MHz
Modulation	1024QAM MIMO 256QAM MIMO 64QAM MIMO 16QAM MIMO QPSK MIMO $\frac{1}{2}$ Rate QPSK xRT $\frac{1}{4}$ Rate QPSK xRT
Integrated Antenna Split	
TX Gain	23 dBi
RX Gain	23 dBi
Beamwidth	6°
Front-to-Back Ratio	70 dB
Polarity	Dual-Slant Polarization
Cross-Polarity Isolation	> 28 dB