

SIMULACIÓN DE UN ENLACE RoF PARA LA TRANSMISIÓN DE IMÁGENES
DIAGNÓSTICAS CARDIO RESPIRATORIAS DE NEONATOS.

NATALY RODRÍGUEZ FRANCO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C.
2020

SIMULACIÓN DE UN ENLACE RoF PARA LA TRANSMISIÓN DE IMÁGENES
DIAGNÓSTICAS CARDIO RESPIRATORIAS DE NEONATOS.

NATALY RODRÍGUEZ FRANCO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico y de
Telecomunicaciones

Director
PhD MÓNICA RICO MARTÍNEZ

Codirector:
PhD RAFAEL PUERTA RAMÍREZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2020



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado en primer lugar a Dios, luego a mis padres Isaura Franco y Orlando Rodriguez, que son mi guía, fortaleza y mayor motivación, a mi hermana Karen Dayana Rodriguez a quien adoro con todo mi corazón, a mi tío Ernesto Franco que desde que tengo memoria siempre ha estado ayudándome y a quien le agradezco su apoyo financiero durante mi carrera universitaria y Por último, pero no menos importante a mis abuelitas Rosa Saavedra y Hortencia Franco, a quienes admiro y son mi fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a todas las personas que fueron parte de este trabajo de grado empezando por mi directora la ingeniera PhD Mónica Rico a quien quiero dar las gracias por su confianza, paciencia y disposición, e igualmente agradecerle por dedicar parte de su tiempo en aclarar mis dudas y en la revisión del documento. Del mismo modo, quiero agradecer al ingeniero PhD Rafael Puerta por su dedicación y aportes los cuáles fueron de gran ayuda durante este proceso de investigación.

Por otra parte, agradezco a la universidad católica de Colombia por disponer a favor herramientas que fortalecieron mi crecimiento tanto personal como profesional. También, a mis profesores por sus valiosos conocimientos, a mi familia quienes siempre confiaron en mí y apoyaron en el transcurso de la carrera. Por último, pero no menos importante darles las gracias a mis compañeros los cuales en todo momento me brindaron su ayuda de manera incondicional.

CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES.....	18
1.2. ANTECEDENTES	18
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.4. OBJETIVOS	28
1.4.1 Objetivo general.....	28
1.4.2 Objetivos específicos.....	28
1.5. JUSTIFICACIÓN	29
1.6. MARCO DE REFERENCIA.....	30
1.6.1. MARCO TEÓRICO	30
1.6.1.1. Radio Sobre fibra.....	30
1.6.1.2. Estación de control	31
1.6.1.3. Estación base	31
1.6.1.4. Sistema SDR (radio definida por software):.....	31
1.6.1.5. Atenuación de la fibra óptica.....	31
1.6.1.6. La adquisición de datos de imágenes médicas	32
1.6.1.7. El procesamiento de imágenes.....	32
1.6.1.8. Imagen digital y comunicaciones en medicina (DICOM).....	32
1.6.2. MARCO CONCEPTUAL.....	33
1.6.2.1. Telemedicina	33
1.6.2.2. La radiografía.....	33
1.6.2.3. Amplificador óptico.....	33
1.6.2.4. Transmisor óptico	34
1.6.2.5. Modulador Mach-Zehnder (MZM)	34
1.6.2.6. Modulación directa.....	35
1.6.2.7. Modulación externa.....	35
1.6.2.8. Transmisión de imágenes médicas.....	35
1.6.2.9. Fibra óptica	35
1.7. MARCO LEGAL	35
1.8. METODOLOGÍA.....	36
2. IMAGENES PARA TELEDIAGNÓSTICO.....	39
2.1 IMÁGENES DIAGNÓSTICAS	39
2.1.1. Pixel.....	39
2.1.2. Escala de grises	39
2.1.3. Color	41
2.1.2. Resolución	42
2.1.4. Resolución espacial	42
2.1.5. Resolución de contraste	43
2.1.6. El tamaño del archivo	43
2.2 IMÁGENES CARDIORRESPIRATORIAS	46
3. RADIO SOBRE FIBRA	48
3.1. Tipos de radio sobre fibra	48
3.1.1 Modulación externa en radio frecuencia	48

3.1.2	Modulación externa en frecuencia intermedia	49
3.1.3	Modulación externa en banda base.....	49
3.1.4	Modulación directa en banda base.....	50
3.2.	Descripción del montaje general del enlace radio sobre fibra.....	51
3.3.	Software.....	52
3.3.1.	GNU-Radio	55
3.3.2.	OptiSystem.....	55
4.	SIMULACIÓN.....	57
4.1	SIMULACIÓN SOFTWARE GNU-RADIO	57
4.1.1	File source y sink.....	57
4.1.2	Noise source y bloque Add.....	58
	Fuente: Autor.....	58
4.1.3	Packet encoder y decoder.....	58
4.1.4	Bloque psk mod y psk dem.....	59
4.1.5	Wx gui fft sink.....	60
4.1.6.	Bloque multiply const y throttle.....	61
4.1.7	Variable.....	61
4.1.9	Error rate y probe rate.....	62
4.1.10	Message strobe y message debug.....	62
4.2	SIMULACIÓN SOFTWARE OPTISYSTEM.....	67
4.2.3	MZN modulator analytical.....	67
4.2.4.	Fotodetector.....	67
4.2.5	Optical fiber.....	67
4.2.6	Cw laser.....	68
4.2.7	Low pass Gaussian filter.....	68
5.	RESULTADOS	70
5.1	RESULTADOS GNU-RADIO	72
5.2	RESULTADOS OPTISYSTEM.....	81
5.3	RESULTADOS GENERALES	95

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características de imágenes según su modalidad.....	20
Tabla 2. Cantidad de tonos de una imagen digital.....	40
Tabla 3. Características de las imágenes diagnósticas	41
Tabla 4. Unidades de medida de la información	45
Tabla 5. Modulación Bits/Symbol.....	59
Tabla 6. Datos de medición en GNU-radio con data rate de 20Mbps.....	73
Tabla 7. Datos de medición en GNU-radio con data rate de 200Mbps.....	74
Tabla 8. Datos de medición en GNU-radio con data rate de 2Gbps.....	74
Tabla 9. Tasa de error de bits con data rate de 20Mbps en GNU-Radio	79
Tabla 10. Tasa de error de bits con data rate de 200Mbps en GNU-Radio	79
Tabla 11. Tasa de error de bits con data rate de 2Gbps en GNU-Radio	80
Tabla 12. Tasa de error de bits con data rate de 15Gbps a 10Km en OptiSystem	82
Tabla 13. Tasa de error de bits con data rate de 20Gbps en OptiSystem.	83
Tabla 14. Tasa de error de bits con un data rate de 100Gbps en OptiSystem.	85
Tabla 15. Tasa de error de bits con velocidad de 250Gbps en OptiSystem.	87
Tabla 16. Distancia de 20Km con un data rate de 15Gbps.....	89
Tabla 17. Distancia de 30Km con un data rate de 40Gbps.....	90
Tabla 18. Distancia de 70Km con un data rate de 40Gbps.....	92

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Características de las redes de fibra óptica de la era 5G	19
Figura 2. Consulta remota envió de radiografías	21
Figura 3. Modulador Mach-Zehnder.....	24
Figura 4. Arquitectura de enlace de bajada (Down link)	25
Figura 5. Componentes de un sistema RoF.....	30
Figura 6. Resolución de imagen por pantalla.....	42
Figura 7. Tamaño de pixeles en una radiografía digital.	44
Figura 8: Radiografía de tórax para examen de neumonía de un neonato	46
Figura 9. Modulación externa en RF	48
Figura 10. Modulación externa en IF	49
Figura 11. Modulación externa en banda base	50
Figura 12. Modulación directa en banda base	50
Figura 13. Montaje de radio sobre fibra	51
Figura 14. Bloques File Source y File Sink biblioteca de GNU-radio	57
Figura 15 Noise source y bloque Add biblioteca de GNU-radio	58
Figura 16. Bloques Packet Encoder y Packet Decoder biblioteca de GNU-radio ..	58
Figura 17. Bloques PSK Mod y PSK Demod biblioteca de GNU-radio	59
Figura 18. Bloque WX GUI FFT Sink biblioteca de GNU-radio	60
Figura 19. Bloques Multiply Const y Throttle biblioteca de GNU-radio	61
Figura 20. Bloques Variable y Options biblioteca de GNU-radio.....	61
Figura 21. Bloque WX GUI Constellations Sink biblioteca de GNU-radio	62
Figura 22. Bloques error rate y probe rate biblioteca de GNU-Radio.....	62

Figura 23. Bloques message strobe y message debug biblioteca de GNU-Radio.	63
Figura 24. Simulación enlace radio con GNU-radio	63
Figura 25. Simulación enlace radio, escenario con ruido en GNU-radio.....	64
Figura 26. Simulación error rate enlace radio en GNU-radio.	65
Figura 27 Diagrama de constelaciones modulación PSK	66
Figura 28. Simulación enlace radio sobre fibra con OptiSystem.....	69
Figura 29. Visualización del tamaño de imagen radiográfica con diferentes data rate.	75
Figura 30 Transmisión de una imagen radiográfica con diferentes data rate. A). Imagen original, B) imagen a 20Mbps, C). Imagen a 200Mbps, D). Imagen a 2Gbps.	76
Figura 31. Gráfica de constelaciones sin ruido en GNU Radio.	77
Figura 32. Gráfica de constelaciones con ruido en GNU Radio.....	78
Figura 33. Tasa de error de bits del enlace radio en GNU-Radio	81
Figura 34. Diagrama de ojo con data rate de 15Gbps	83
Figura 35. Diagrama de ojo con data rate de 20Gbps	84
Figura 36. Diagrama de ojo con data rate de 100Gbps.	86
Figura 37. Diagrama de ojo con data rate de 250Gbps	87
Figura 38. Tasa de error de bits con diferentes velocidades de muestreo.....	88
Figura 39. Diagrama de ojo con distancia de 20Km.	90
Figura 40. Diagrama de ojo con distancia de 30Km.	91
Figura 41. Diagrama de ojo con distancia de 70Km	92
Figura 42. Diagrama de ojo con distancia de 71Km.	93

Figura 43. Alcance de transmisión variando la distancia de fibra óptica94

TABLA DE ANEXOS

Anexo A. Estudio de vigilancia tecnológica (Ver archivo anexo).....	108
Anexo B. Tamaño de imágenes transmitidas, con un data rate de 20Mbps	108
Anexo C. Tamaño de imágenes transmitidas, con un data rate de 200Mbps	109
Anexo D. Tamaño de imágenes transmitidas, con un data rate de 2Gbps	110

GLOSARIO

BIT: Se basa en un sistema de numeración binario y se utiliza para determinar la cantidad de información almacenada. Como sistema binario, hay dos valores 1 y 0, que se utilizan como unidades¹.

BYTE: Unidades de información utilizadas por computadoras. Cada byte está compuesto por ocho bits².

DATA RATE: La velocidad a la que se transfieren los datos dentro de la computadora o entre un dispositivo periférico y la computadora, medida en bytes por segundo³.

DIAGRAMA DE OJO: Esencialmente corresponde a un gráfico que muestra la superposición de diferentes combinaciones posibles de uno y cero en un rango de tiempo específico o número de dígitos⁴.

FIBRA ÓPTICA: Filamento de vidrio altamente transparente, que puede transmitir información a largas distancias a través de señales ópticas⁵.

PATOLOGÍA: Conjunto de síntomas de una enfermedad⁶.

TASA DE ERROR DE BITS: Es la relación entre el número de elementos erróneos (que pueden ser bits, palabras de código o bloques) en la señal digital recibida y el número total de elementos transmitidos dentro de un cierto intervalo de tiempo⁷.

TELEMEDICINA: Brindar atención médica remota mediante el uso de información electrónica y tecnologías como computadoras, cámaras, videoconferencias, Internet, comunicaciones satelitales e inalámbricas⁸.

¹ Editorial Definición MX., "Resultados Para Bit.," February 12, 2015, p. 1, <https://definicion.mx/?s=Bit>.

² Glosario informático, "Diccionario de Términos Informáticos," 2007, p. 3, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Glosario_Informático.pdf.

³ BROWSE ENCYCLOPEDIA, "Definition of Data Rate | PCMag," accessed May 21, 2020, p. 1, <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/data-rate>.

⁴ José Dinamarca Ossa, "Análisis de Diagramas de Ojo," November 6, 2002, p. 2, <https://docplayer.es/2638743-Analisis-de-diagramas-de-ojo.html>.

⁵ RAE - ASALE, "Fibra | Definición | Diccionario de La Lengua Española | RAE - ASALE," accessed June 29, 2020, p. 1, <https://dle.rae.es/fibra?m=form#4kv82fy>.

⁶ RAE - ASALE, "Patología | Definición | Diccionario de La Lengua Española | RAE - ASALE," accessed May 21, 2020, p. 1, <https://dle.rae.es/patología?m=form>.

⁷ real academia de Ingeniería, "Tasa de Error | Real Academia de Ingeniería," accessed May 21, 2020, p. 1, <http://diccionario.raing.es/es/lema/tasa-de-error.Ingeniería>.

⁸ NIH, "Definición de Telemedicina - Diccionario de Cáncer - National Cancer Institute," accessed May 21, 2020, p. 1, <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/telemedicina>.

RESUMEN

El siguiente trabajo de grado consiste en la simulación de un enlace de radio sobre fibra para la transmisión de imágenes diagnósticas en patologías cardiorrespiratorias de neonatos, es por esta razón que más adelante se encuentran aspectos relevantes sobre las imágenes diagnósticas como: su tamaño, pixeles y resolución, junto con las características de los componentes y configuración básica de un sistema radio sobre fibra. Además, de los resultados producto de la simulación en GNU radio de un enlace radio que compara cómo es la señal de transmisión cuando se envía una imagen radiográfica de tórax de 40,1KB con data rates de 20Mbps, 200Mbps y 2Gbps, en un escenario ideal, únicamente de radio sin canal de fibra óptica. También se presentan los resultados de la tasa de error de bits de la simulación en OptiSystem de todo el enlace radio sobre fibra con data rates más altos de 15Gbps, 20Gbps, 100Gbps y 250Gbps, lo que comprueba que el prototipo es totalmente funcional con una tasa de error de bit cercana a cero.

INTRODUCCIÓN

Recientemente, los sistemas de radio sobre fibra (RoF), se posicionan como una tecnología fundamental en el avance de las telecomunicaciones ya que en los últimos años el aumento de acceso inalámbrico eficiente, el ancho de banda y el tráfico de datos se ha intensificado⁹. Por lo que las redes de acceso inalámbrico y de fibra están requiriendo de actualizaciones, con el objetivo de responder a la explosiva demanda de capacidad de datos en las sociedades modernas de la información¹⁰. Con esto se espera reducir los tiempos de procesamiento, una menor interferencia, aumentar la cobertura y que su implementación sea de bajo costo.

Debido a las ventajas que presentan los sistemas de radio sobre fibra (RoF), estos sistemas se perfilan para implementar diversas aplicaciones con un acceso inalámbrico eficiente. Un ejemplo es en la transmisión de imágenes diagnósticas. Donde, “el American College of Radiology (ACR) menciona la teleradiología como una herramienta para propósitos diagnósticos y/o de consulta, gracias a esto se pueden transmitir imágenes a gran distancia para que las analicen e interpreten oportunamente desde un mismo lugar de trabajo”¹¹. Esto resulta ser de gran ayuda en patologías que requieren de la toma de imágenes especializadas para poder ser diagnosticadas como son las afecciones cardiorrespiratorias en neonatos.

Con respecto a lo mencionado anteriormente, el siguiente documento describe el diseño de un prototipo de enlace radio sobre fibra (RoF) para transmitir imágenes diagnósticas cardio respiratorias de neonatos con el propósito de enviar una imagen en una sola dirección y verificar la tasa de error de bits. A continuación, se disponen de los siguientes capítulos:

El primero aborda los antecedentes de investigación sobre telemedicina, imágenes diagnósticas, tecnologías de radio sobre fibra (RoF). Además de contener las características de los componentes que conforman un enlace RoF, algunas enfermedades cardiorrespiratorias que se enfrentan los recién nacidos, el marco legal y el desarrollo de la metodología.

El segundo presenta un resumen sobre las propiedades físicas de una imagen diagnóstica como: pixel, color, resolución entre otros, la descripción matemática de

⁹ Manuel Cely et al., “Generación de Señales Para Sistemas de Radio Sobre Fibra Basados En La Combinación Eléctrica de Componentes de Banda Base y Radiofrecuencia,” *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 24, no. 3 (July 2016): p. 404, <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000300005>.

¹⁰ Jhon James Granada et al., “Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band,” 2011, p. 244-246, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612011000200007&lang=es.

¹¹ Alvin García et al., “Ejecución de Un Sistema Piloto de Tele-Radiología En Medellín, Colombia,” *Colomb Med*, vol. 37, September 20, 2006, p. 184, <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/5516>.

las imágenes utilizadas para tele-diagnóstico y su respectiva tabla sobre las características de las imágenes diagnósticas.

El tercero describe algunos tipos de arquitectura comúnmente usados en algunos estudios para el sistema radio sobre fibra, el esquema del montaje general del enlace de radio sobre fibra y la selección de software.

El cuarto contiene el esquema que se realizó para la simulación del enlace radio en GNU Radio, junto con la descripción de sus bloques y el esquema que se realizó para la simulación del enlace radio sobre fibra con el software OptiSystem, junto con la descripción de cada componente.

Por último, en el quinto capítulo se encuentra el análisis de los datos obtenidos. Resaltando, que el desarrollo de este trabajo de grado es un prototipo, por lo que el resultado obtenido es una simulación del enlace radio con el software GNU- Radio y de la simulación del enlace radio sobre fibra (RoF), mediante el software OptiSystem.

1. GENERALIDADES

1.2. ANTECEDENTES

A continuación, se encontrarán algunos proyectos de investigación que se han realizado sobre telemedicina, imágenes diagnósticas y tecnología de radio sobre fibra con el propósito de conocer sus resultados y destacar ideas que puedan aportar en el desarrollo del prototipo del enlace radio sobre fibra para la transmisión de imágenes diagnósticas cardio respiratorias de neonatos. Para ello, se utilizó el software Vosviewer como se puede evidenciar en el Anexo A y Anexo B, de los cuales se destacan las siguientes publicaciones:

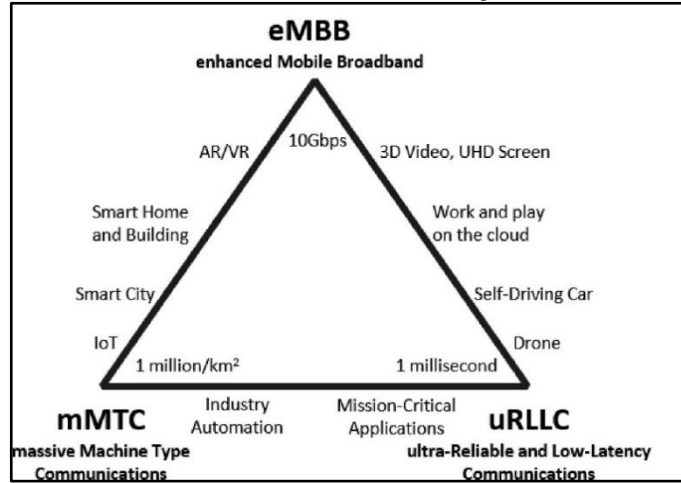
En el artículo realizado por los autores Kokou Adambounou, Victor Adjenou V, et al., se presenta un sistema de comunicación a través de Internet (cámara IP y software de acceso remoto) que permite la transferencia de videos e imágenes de ultrasonido entre el centro remoto de pacientes el cual fue CHR Tsévié, situado a 35 km de Lomé, capital de Togo y los centros expertos eran CHU en Lomé y CHU Trousseau de Tours en Francia (aproximadamente a 4500 km de Tsévié). permitiendo una experiencia en tele-radiología en tiempo real en presencia de un sonógrafo o radiólogo. El sistema se probó en 50 pacientes destacando entre sus resultados la experiencia en tiempo real con un retraso de aproximadamente 1,5 s con un ancho de banda de Internet de alrededor de 1 Mbps (cámara IP) y 512 kbps software de acceso remoto¹²

En un estudio realizado por Liu Xiang, destaca los avances tecnológicos en la transmisión de fibra óptica y las redes en los últimos años y estudia las perspectivas sobre qué esperar en la próxima era de 5G. Además, se describe las ventajas de la próxima red inalámbrica de quinta generación (5G) como su gran ancho de banda, baja latencia, sincronización precisa y la capacidad de realizar cortes de red. En la Figura 1 se pueden observar las tres características principales como lo son: banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC), y comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (uRLLC), soportan colectivamente una amplia gama de tipos de servicios y son compatibles con las nuevas aplicaciones que se espera que surjan en la era 5G¹³.

¹² Kokou Adambounou et al., "A Low-Cost Tele-Imaging Platform for Developing Countries," *Frontiers in Public Health* 2, no. SEP (September 5, 2014), p. 1-4, <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00135>

¹³ Xiang Liu, "Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era," *IScience* (Elsevier Inc., December 20, 2019), p. 492, https://www.researchgate.net/publication/337353783_Evolution_of_Fiber-Optic_Transmission_and_Networking_Towards_the_5G_Era.

Figura 1. Características de las redes de fibra óptica de la era 5G



Fuente: XIANG, Liu. Características principales de 5G y sistemas de fibra óptica orientados a 5G. [Imagen]. Evolución de la transmisión de fibra óptica y redes hacia la era 5G. 2019. 492 p. [Consultado: 8 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.026>

Con respecto a las imágenes diagnósticas se encuentran las siguientes investigaciones:

Dentro de algunos aportes se encuentra una plataforma colaborativa basada en el estándar DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), conocido en español como “comunicación de imágenes digitales en medicina”, que es el encargado de estandarizar las imágenes que se utilizan para diferentes tipos de exámenes médicos entre ellos tomografías, radiografías, resonancias, etc., con el propósito de almacenar las imágenes en un único formato permitiendo la transmisión de información entre equipos de diferentes fabricantes¹⁴.

De acuerdo, a lo mencionado anteriormente, es necesario resaltar que los autores Ilias Maglogiannis, Christos Andrikos, et al., plantean el diseño de una plataforma DICOM para la teleconsulta médica en tiempo real sobre imágenes médicas. La plataforma propuesta combina los principios de los sistemas heterogéneos de gestión del flujo de trabajo (WfMS, Workflow Management System), la arquitectura de redes punto a punto y el concepto SPA (aplicación de una sola página) para facilitar la atención médica e intervenir en la colaboración de profesionales sanitarios distribuidos geográficamente. El trabajo presentado aprovecha las características de vanguardia de la web para admitir la comunicación entre pares utilizando el protocolo WebRTC (Web Real Time Communication) y el procesamiento de datos del lado del cliente para crear un entorno de colaboración integrado. Además,

¹⁴ David Rojas et al., “Manual de Salud Electrónica Para Directivos de Servicios y Sistemas de Salud,” accessed June 3, 2020, p. 144-146, https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3023/1/S2012060_es.pdf.

discute los detalles técnicos de la implementación y presenta el funcionamiento de la plataforma en la práctica junto con algunos resultados iniciales¹⁵.

Un grupo de ingenieros describen en el artículo de la revista Colombia médica, cómo desarrollar un sistema con software de acceso remoto que permita la comunicación e interpretación a distancia de imágenes biomédicas. Para ello, desarrollaron una aplicación en Java con funciones que permiten su manipulación y la opción de exportar a otros formatos entre ellos JPEG (Joint Photographic Experts Group), TIFF (Tagged Image File Format) y BMP (Bit Mapped Picture)¹⁶. Obteniendo como resultados la lectura y visualización local de imágenes almacenadas en formato DICOM. Así mismo, dentro de su investigación mencionan que “el tamaño de las imágenes digitales es un factor crítico para garantizar la calidad diagnóstica del estudio es por esto que utilizan la información que aparece en la Tabla 1, resaltando su importancia en este proyecto para poder identificar las características de las imágenes diagnósticas en cuanto a resolución y tamaño”¹⁷.

Tabla 1. Características de imágenes según su modalidad

Modalidad	Resolución (pixel)	Imagen por estudio	Tamaño (MB)
Radiografía digital	4096 x 4096 x 10	4	80.0
Radiografía computarizada	2048 x 2048 x 10	4	20.0
Mamografía	4096 x 4096 x 10	2	40.0
Resonancia magnética	512 x 512 x 8	50	12.5
Tomografía computarizada	512 x 512 x 8	30	07.5
Medicina nuclear	512 x 512 x 8	20	05.0
Angiografía	512 x 512 x 8	20	05.0
Ultrasonido	512 x 512 x 8	36	09.0

Fuente: García, Alvin, et al. Características de imágenes por modalidad de acuerdo con los estándares de la ACR. [en línea]. Ejecución de un sistema piloto de tele-radiología en Medellín, Colombia. 2006. 185 p. [Consultado: 8 de enero de 2020]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cm/v37n3/v37n3a02.pdf>

Por otra parte, el autor Tomás Aceves menciona la importancia de los PACS (Picture Archiving and Communication System) que según sus siglas en inglés traduce “sistema de comunicación y archivado de imágenes”. Este tipo de sistema ofrece una alternativa en el manejo de imágenes digitales en forma eficiente a través de dispositivos conectados en una red, permitiendo proveer servicios de almacenamiento, tratamiento y transferencia de información, para dar soporte a las

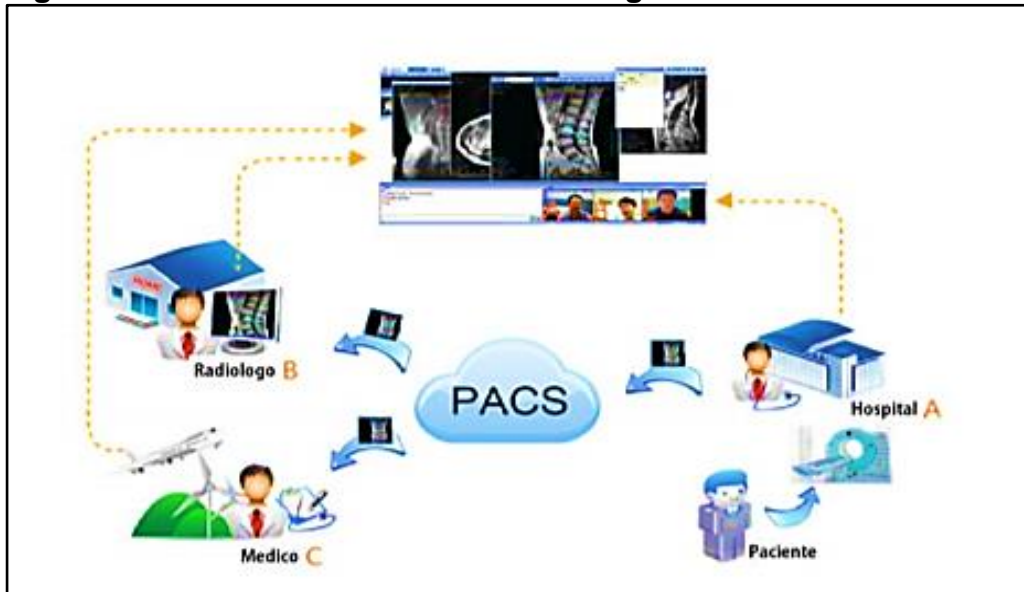
¹⁵ Ilias Maglogiannis et al., “A DICOM Based Collaborative Platform for Real-Time Medical Teleconsultation on Medical Images,” 2017, p. 79–81, https://doi.org/10.1007/978-3-319-57348-9_7

¹⁶ Alvin García et al., “Ejecución de Un Sistema Piloto de Tele-Radiología En Medellín, Colombia,” *Colomb Med*, vol. 37, 2006, p. 187, <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/5516>.

¹⁷ *Ibid.*, p. 185.

áreas donde se genera un volumen importante de imágenes¹⁸. A continuación, se observa en la Figura 2 el diseño e Implementación de un sistema PACS basado en el estándar DICOM, con el propósito de obtener un software de calidad que permita disminuir la dependencia tecnológica¹⁹.

Figura 2. Consulta remota envío de radiografías



Fuente: ACEVES, Tomás. Consulta remota interactiva. [imagen]. Administración de plantas médicas. México: Infotec. 2015. 43 p. [Consultado: 8 de enero de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yc9vblsg>

En la Figura 2 se puede observar como el paciente se acerca al hospital donde se encuentra la máquina de rayos x necesaria para realizar el examen, luego estas imágenes son enviadas a un radiólogo y un médico quienes las evalúan y envían el respectivo diagnóstico a una base de datos la cual tiene acceso el hospital. Es así como la anterior investigación permite conocer el funcionamiento detallado acerca de las técnicas y modalidades de imagen digital. Además de comprender la base del estándar DICOM y la estructura adecuada para el almacenamiento de las imágenes radiográficas utilizando técnicas de compresión sin pérdida de información mejorando la capacidad de almacenamiento y la velocidad de transferencia de los datos a través de las redes digitales de comunicación²⁰.

¹⁸ Tomás Aceves, “ADMINISTRACIÓN DE PLANTAS MÉDICAS HOSPITALARIAS” (México, November 23, 2015), p. 1, [https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/115/1/Tesis Tomás Aceves Jaime.pdfv](https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/115/1/Tesis%20Tomás%20Aceves%20Jaime.pdfv).

¹⁹ *Ibíd.*, p. 6.

²⁰ Dra Maki and Esther Ortiz Domínguez, “DR. JOSÉ ÁNGEL CÓRDOVA VILLALOBOS SUBSECRETARIA DE INNOVACIÓN Y CALIDAD DIRECTORA GENERAL DEL CENTRO NACIONAL DE EXCELENCIA TECNOLÓGICA EN SALUD,” accessed May 20, 2020, p. 10-12, http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/biomedica/guias_tecnologicas/41gt_PACS.pdf.

En cuanto a los antecedentes relacionados con los sistemas híbridos se puede destacar las siguientes investigaciones:

Recientemente, los autores Christina Lim, Dalma Novak et al., realizan una investigación de las redes híbridas de fibra inalámbrica que incorporan la tecnología WDM para acceso inalámbrico fijo que operan en las regiones de frecuencia de onda submilimétrica y milimétrica (onda milimétrica mm), las cuales se están investigando activamente para proporcionar comunicaciones inalámbricas de ancho de banda ultra alto. La arquitectura de tales redes de radio requiere que se despliegue una gran cantidad de estaciones base de antena con alto rendimiento para maximizar la cobertura geográfica con las principales funciones de conmutación y enrutamiento ubicadas en una ubicación centralizada. El transporte de señales inalámbricas de onda milimétrica dentro de la fibra está sujeto a varios impedimentos, incluida la baja eficiencia de conversión optoelectrónica, la dispersión cromática de fibra y también la degradación debido a las no linealidades a lo largo del enlace. Uno de los principales desafíos técnicos en la implementación de tales redes radica en la mitigación de las distorsiones de las señales generadas dentro de la fibra óptica. En el artículo se presenta una descripción general de diferentes técnicas para transportar en fibras señales de radio-frecuencia de onda mm y para superar las deficiencias asociadas con el transporte de las señales inalámbricas.²¹

También se han realizado trabajos científicos sobre la tecnología de radio sobre fibra en donde James Granada, Claudia Serpa, et al. Exponen en su artículo exponen algunas arquitecturas de sistemas radio sobre fibra, los problemas más importantes que tienen las redes inalámbricas frente a las alámbricas y su convergencia hacia las redes de quinta generación (5G) por lo que dentro de su investigación afirman que, la tecnología RoF es una de las propuestas con mayor proyección para las redes de acceso debido a que combina las ventajas que ofrece la fibra óptica con las señales radioeléctricas. Adicionalmente, dentro del estudio se identifica un mayor interés por el uso de ondas milimétricas en especial en el rango de 75GHz – 100GHz y finalmente, los autores concluyen que en Colombia la investigación con respecto a radio sobre fibra resulta ser de gran impacto debido al interés de la articulación entre las tecnologías de información y comunicaciones con las políticas de desarrollo social²².

Así mismo, continuando con investigaciones relacionadas con el sistema de comunicación híbrido, radio sobre fibra, en 2001 se realizó un estudio por parte de

²¹ Ampalavanapillai Nirmalathas et al., "Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, no. 4 (February 15, 2010), p. 390–405, <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-28-4-390>

²² Jhon James Granada Torres et al., *Ingeniería y Desarrollo*, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 29 (Fundación Universidad del Norte, 2011), p. 260-261, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S012234612011000200007&lng=en&nrm=iso.

Christina Lim, Dalma Novak et al., que consistía en la evolución de las redes de acceso que combinan ondas milimétricas y señales radioeléctricas en fibras ópticas. La investigación consistía en las futuras redes de acceso de radio que operan en frecuencias de ondas milimétricas donde tienen la capacidad de ofrecer servicios interactivos de banda ancha a una base de clientes que requieren acceso sin restricciones. Las redes de alimentación de fibra óptica que incorporan multiplexación por división de longitud de onda se han propuesto como una red troncal que proporciona interconectividad dúplex total entre varias estaciones base de antenas remotas y una oficina central que implementa una variedad de funciones de conmutación y enrutamiento. Los rápidos desarrollos en las tecnologías fotónicas y de microondas permiten un progreso de las redes de radio-fibra de ondas milimétricas en las áreas de tecnologías habilitadoras asociadas, subsistemas y demostraciones de sistemas²³.

En el año 2016 Manuel Cely, Rafael Muñoz et al., realizaron un estudio sobre el proceso de generación de señales a través de la definición del campo eléctrico en función de los índices de modulación de las señales de banda base y radiofrecuencia²⁴. Mediante modelado de la función de campo se encuentra que los índices de modulación presentan una fuerte dependencia entre sí y se obtiene su valor óptimo a fin de garantizar una buena calidad para ambas señales a la salida del transmisor²⁵. Así mismo resalta la importancia del modulador tipo Mach-Zehnder (MZ), los cuales utilizan la siguiente estructura como se muestra en la Figura 3. Por otra parte, como mencionan los autores “en este dispositivo, la luz se divide en partes iguales entre dos guías de ondas paralelas en la superficie del sustrato y se recombina nuevamente en la salida. La variación en el índice de refracción se traduce en un cambio de alguna de las propiedades de la señal óptica: amplitud, frecuencia, fase o polarización”²⁶.

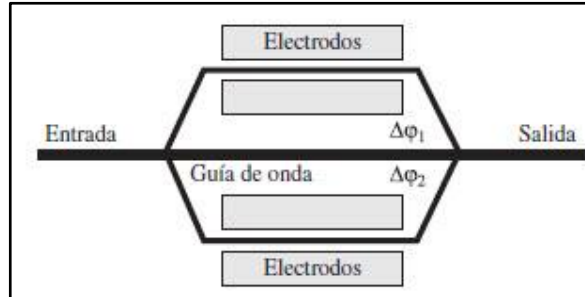
²³ C. Lim et al., “Technique for Increasing Optical Spectral Efficiency in Millimetre-Wave WDM Fibre-Radio,” *Electronics Letters* 37, no. 16 (2001), p. 1043, <https://doi.org/10.1049/el:20010676>.

²⁴ Manuel Cely et al., “Generación de Señales Para Sistemas de Radio Sobre Fibra Basados En La Combinación Eléctrica de Componentes de Banda Base y Radiofrecuencia,” *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 24, no. 3 (2016), p. 403, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77246569005>.

²⁵ *Ibid.*, p. 409.

²⁶ *Ibid.*, p. 405.

Figura 3. Modulador Mach-Zehnder



Fuente: MUÑOZ, Rafael, et al. Modulador MZ de control doble. [imagen]. Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica. Ingeniería Investigación y Tecnología. 2015. 587 p. [Consultado: 9 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.010>

En el año 2018, un grupo de investigación de la universidad Nacional de Colombia realizaron un estudio que consistía en un análisis y comparación experimental de la latencia para diferentes esquemas de modulación con diferentes tasas de transmisión en un enlace radio sobre fibra en banda W²⁷. La principal contribución del artículo es que se demuestra un enlace en banda W, radio sobre fibra, el cuál encaja en los indicadores de desempeño de las redes²⁸ en este caso de 5G.

En el estudio realizado por Eduardo Fernández, Jhon Torres, et al., se tiene como objetivo evaluar el proceso de digitalización en el desempeño de un escenario basado en radio sobre fibra, para ello se tiene en cuenta la distancia del enlace y el número de bits de resolución del convertor analógico a digital (ADC). Dentro de las contribuciones se tiene que la relación señal a ruido es independiente de la distancia de transmisión excepto cuando el nivel de señal cae por debajo de la sensibilidad del fotodetector del enlace óptico, esto afecta la magnitud del vector de error y tiene efectos sobre la tasa de error de bits. Sin embargo, con los resultados para el escenario RoF digitalizado a frecuencia intermedia, se tiene una mejora en la relación señal a ruido, aumentando la longitud de alcance en 7 km y la tasa de bits desde 1.25 Gbps hasta 10 Gbps con un ADC de 8 bits (8 bits \times 1.25 Gbps), generando una solución flexible y de bajo costo²⁹.

Con respecto a lo mencionado anteriormente en la Figura 4 se puede apreciar cómo se compone un enlace de bajada para un sistema RoF digitalizado a frecuencia intermedia, donde la señal de entrada es trasladada a una frecuencia intermedia

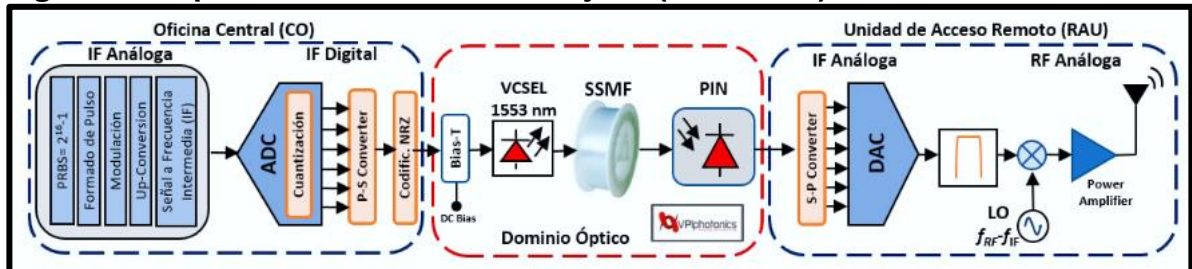
²⁷ Mónica Andrea Rico-Martínez et al., "Latency Analysis on W-Band Hybrid Fiber-Wireless Link Using Software Defined Radio in Real Time," *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 87 (June 2018), p. 16, <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n87a03>.

²⁸ *Ibíd.*, p. 21.

²⁹ Eduardo Avendaño Fernández et al., "Análisis Del Impacto de La Conversión Analógica a Digital En El Desempeño de Sistemas RoF Digitalizado," *INGE CUC* 15, no. 1 (March 23, 2019), p. 79, <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.1.2019.07>.

(IF) más baja que la señal RF, donde esta señal se utiliza para modular el láser en el transmisor. Luego de la detección, la señal IF es trasladada a la señal de radio frecuencia (RF) requerida antes de la transmisión inalámbrica.

Figura 4. Arquitectura de enlace de bajada (Down link)



Fuente: AVENDANO, Eduardo, et al. Arquitectura de enlace de bajada (Down link) para RoF Digitalizado a frecuencia intermedia (IF). [Imagen]. Análisis del impacto de la conversión Analógica a Digital en el desempeño de Sistemas RoF Digitalizado. 2019. 78 p. [Consultado: 9 de enero de 2020]. Disponible en: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/1861/2047>

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Organización Mundial de Salud (OMS), define la mortalidad neonatal como la muerte entre el nacimiento y los 28 días de vida³⁰. Durante este periodo, el recién nacido presenta mayor riesgo de morir. Cada año, aproximadamente tres millones de neonatos mueren en todo el mundo, de estos, el 50% muere en las primeras 24 horas después del nacimiento y el 75% al final de la primera semana³¹. Además, “se estima que, en el mundo por cada 1.000 nacidos vivos, 21 mueren antes de cumplir el día 28; y en los países de ingresos medios altos, 10 de cada 1.000 no los superan”³².

En Colombia, la mortalidad neonatal es responsable del 57% de las muertes en el primer año de vida, con una tasa de mortalidad infantil de 24 muertes por cada 1,000 nacimientos vivos³³. Esto se debe en un 80 % a factores relacionados con

³⁰ Carlos Mario Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas., Victor Hugo Robles Calvillo, and José Alejo Hernández Blé, *Revista Cubana de Salud Pública., Revista Cubana de Salud Pública*, vol. 35 (Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas, Ministerio de Salud Pública, 1988), p. 2, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662009000100016

³¹ Organización mundial de la salud, “Reducir La Mortalidad de Los Recién Nacidos,” September 19, 2019, p. 1, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/newborns-reducing-mortality>.

³² Andrea Yanira et al., “Análisis de Situación de Salud (ASIS) Colombia,2018,” 2018, p. 237, <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/asis-colombia-2018.pdf>.

³³ Javier Torres-Muñoz et al., “Risk Factors Associated with the Development of Perinatal Asphyxia in Neonates at Hospital Universitario Del Valle, Cali, Colombia, 2010-2011,” *Biomédica* 37 (October 31, 2016), p. 52, <https://doi.org/10.7705/biomedica.v37i1.2844>.

malformaciones, complicaciones por nacimiento prematuro e infecciones³⁴, un caso en específico es la patología respiratoria que “constituye la causa más frecuente de morbilidad en neonatos, y puede afectar desde el 2% al 3% de los recién nacidos y hasta el 20% de los que tienen un peso al nacer menor de 2,5 kg”³⁵. De la misma manera la función cardíaca se ve afectada por la gravedad de la dificultad respiratoria.

La disminución del gasto cardíaco y la baja contractilidad miocárdica son complicaciones comunes del síndrome de dificultad respiratoria en el recién nacido prematuro³⁶. Estas complicaciones causan enfermedades cardiorrespiratorias como lo son como: líquido pulmonar persistente (TTRN), aspiración de líquido amniótico meconial, neumonía, displasia broncopulmonar, enfermedades por deficiencia surfactante, neumotórax, entre otras.

Por otra parte, en la mayoría de casos médicos “la orientación diagnóstica de un recién nacido con dificultad respiratoria se establece analizando conjuntamente los datos de anamnesis, examen físico, radiografía de tórax y las pruebas de laboratorio”³⁷. Donde, enfermedades como: líquido pulmonar persistente (TTRN), aspiración de líquido amniótico meconial, neumonía, displasia broncopulmonar, enfermedades por deficiencia surfactante, neumotórax, entre otras requieren de la toma de imágenes especializadas para poder ser diagnosticadas. Por lo general los neonatos que las padecen se encuentran en unidades de cuidados intensivos o en urgencias. Tratándose de la vida de un recién nacido es imperativo y urgente, la presencia de un especialista en imágenes que permita diagnosticar la patología para su posterior tratamiento.

En Colombia, una de las limitaciones en el servicio médico especializado es el tiempo de consulta ya que de acuerdo a la ley 100 de 1993, determina 20 minutos de duración por cada paciente³⁸. Es por esta razón que acceder y compartir información médica entre profesionales e instituciones del sector de la salud en tiempo real, sobre interpretación o consulta es importante para resolver con rapidez, situaciones que tienen impacto en la atención eficaz de los pacientes. En el contexto nacional y regional, existen entidades de salud que cuentan con equipos y

³⁴ Alfredo Ovalle et al., “Factores Asociados Con El Parto Prematuro Entre 22 y 34 Semanas En Un Hospital Público de Santiago,” *Revista Médica de Chile* 140, no. 1 (January 2012), p. 19, <https://doi.org/10.4067/S0034-98872012000100003>

³⁵ Óscar Eduardo Castro-Delgado et al., “Muy Bajo y Extremo Bajo Peso Al Nacer,” *Pediatría* 49, no. 1 (January 1, 2016), p. 24–27, <https://doi.org/10.1016/J.RCPE.2016.02.002>

³⁶ Sameh S. Fahmey et al., “Cardiac Troponin T in Neonates with Respiratory Distress,” *Egyptian Pediatric Association Gazette* 66, no. 4 (December 1, 2018), p. 102, <https://doi.org/10.1016/J.EPAG.2018.09.004>

³⁷ N. ARENAS, O. BLANCHARD, and P. L.M. PASI, “Tuberculosis de La Mama,” *Anais Brasileiros de Ginecologia* 27, no. 3 (March 1, 1949), p. 66, <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistamedicasuis/article/view/8197>.

³⁸ Alejandra Rodríguez Torres, Edgar C. Jarillo Soto, and Donovan Casas Patiño, “Medical Consultation, Time and Duration,” *Medwave* 18, no. 5 (September 26, 2018), p. 1, <https://doi.org/10.5867/medwave.2018.05.7264>

profesionales de alta calidad. Sin embargo, los altos costos en equipos especializados para diagnóstico médico, hacen que sean pocos los pacientes e instituciones médicas que puedan tener acceso a estos exámenes y tecnología, sobre todo en entidades públicas o en regiones apartadas de los centros urbanos de importancia³⁹.

Hoy en día se cuenta con una amplia infraestructura de telecomunicaciones y desarrollos en informática, así como la disponibilidad de formatos estándares de almacenamiento y comunicación en medicina, que permiten establecer plataformas propicias para el desarrollo de sistemas que conecten en red equipos especializados en el diagnóstico de imágenes y la posibilidad de transmitir y compartir información entre las diferentes instituciones hospitalarias, centros de diagnóstico médico especializado, departamentos radiológicos y demás actores del sistema. Esto haría más efectiva la prestación de los servicios de salud, al disminuir los tiempos de respuesta, los posibles riesgos y los costos relativos al transporte de pacientes y profesionales y propiciaría la creación de ambientes de colaboración entre profesionales e instituciones⁴⁰.

Dado lo anterior, surge la necesidad de usar la tecnología para optimizar los procesos que se llevan en los hospitales del país, en cuanto al tratamiento de las enfermedades cardiorrespiratorias de los neonatos. De tal forma que se mejore el tiempo de respuesta de un especialista en imágenes y se pueda llegar a realizar una teleconsulta para diagnosticar dichas patologías. Para ello es necesario contar con un sistema de transmisión en tiempo real que permita el envío y la recepción de imágenes de alta resolución tomadas de los bebés recién nacidos. Surgiendo la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo se realiza el diseño y simulación de un prototipo para la transmisión de imágenes cardiorrespiratorias basado en tecnologías radio sobre fibra?

³⁹ Andrés Fernández, "Salud-e: Promesas y Desafíos Para La Inclusión Social," July 12, 2010, p. 1, <https://www.cepal.org/cgi-bin/getprod.asp?xml=/socinfo/noticias/paginas/9/40689/P40689.xml&xsl=/socinfo/tpl/p18f.xsl&base=/socinfo/tpl/top-bottom.xsl>.

⁴⁰ García et al., "Ejecución de Un Sistema Piloto de Tele-Radiología En Medellín, Colombia", Op. cit., p. 184.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general.

Simular un prototipo de un enlace radio sobre fibra para transmisión de imágenes diagnósticas en patologías cardiorrespiratorias de neonatos.

1.4.2 Objetivos específicos.

1. Diseñar un enlace radio sobre fibra que transmita una imagen diagnóstica que cumpla con las variables previamente identificadas y características de la imagen en cuanto al tamaño, pixeles y calidad.
2. Evaluar la calidad de la imagen diagnóstica transmitida en cuanto al tamaño, pixeles y resolución.
3. Simular un sistema radio sobre fibra en una sola dirección para transmitir una imagen diagnóstica, teniendo en cuenta el alcance de la señal, los equipos necesarios y la cantidad de información a transportar.
4. Identificar el alcance máximo de transmisión por medio de la comparación de diferentes simulaciones del sistema.

1.5. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, según cifras del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), durante el primer trimestre del 2019 se reportaron 149.528 nacimientos vivos y 54.908 de defunciones, donde un 80 % de estas muertes se atribuyen a factores relacionados con malformaciones, complicaciones por nacimientos prematuros, infecciones, entre otras causas. Además, según estudios realizados por la sociedad colombiana de pediatría el bajo peso (nacer con menos de 2.5 Kg), también da lugar para que se presente la mortalidad en los neonatos.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es necesario abordar la problemática de la mortalidad temprana en recién nacidos, con el fin de crear posibles soluciones, para ello se debe conocer las enfermedades cardiorrespiratorias a que se enfrentan los neonatos, las cuales en su mayoría se originan por el esfuerzo que debe hacer el recién nacido en reemplazar el líquido pulmonar fetal por aire, así lo afirma Frank Wenceslao, et al, quien expone lo siguiente:

El reemplazo del líquido pulmonar fetal por aire, es un fenómeno mecánico que requiere de la aplicación de presiones transpulmonares elevadas para lograr introducir aire al pulmón en las primeras respiraciones; estas fuerzas deben superar tres elementos: viscosidad del líquido pulmonar, tensión superficial y resistencia de los tejidos. La expansión del tórax, así como el primer llanto, hacen que los bronquios aspiren aire que llena los alveolos pulmonares, se libera una sustancia denominada surfactante que evita el colapso alveolar con la salida de aire de los pulmones (exhalación). Cualquier anomalía en estos mecanismos de adaptación, provoca alteración pulmonar y la aparición de un síndrome de dificultad respiratoria⁴¹.

Con respecto al párrafo anterior, se puede destacar que dentro del proceso de adaptación que presenta el neonato al pasar de una respiración intrauterina a través de la placenta, por la extrauterina mediante el pulmón genera enfermedades al recién nacido por su adaptación cardiopulmonar con el medio externo, ocasionando varias patologías cardiorrespiratorias, entre las más frecuentes se encuentran: Líquido pulmonar persistente (TTRN), enfermedad por deficiencia surfactante, aspiración de líquido amniótico meconial, neumonía, displasia broncopulmonar, neumotórax, entre otras.

Teniendo en cuenta las enfermedades anteriormente mencionadas cabe destacar que estas patologías requieren un análisis de imágenes médicas de forma inmediata para su respectivo diagnóstico. Es por esta razón que implementar un sistema radio sobre fibra proporciona ventajas como: mayor ancho de banda, bajo costo, mejor flexibilidad, alta velocidad de transmisión de datos, inmunidad al ruido entre otras;

⁴¹ Yamilé Wenceslao, Frank; Labarrere Cruz, Yureisy; González Hernández, Gretel; Barrios Rentería, “Factores de Riesgo Del Síndrome Dificultad Respiratoria de Origen Pulmonar En El Recién Nacido,” July 20, 2007, p. 1, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03192007000300005&lang=es#cargo.

este éxito se explica por varias propiedades que hacen que las fibras ópticas sean adecuadas para aplicaciones médicas. Por otra parte, al ser la fibra óptica compatible con nuevas tecnologías entre ellas el sistema radio sobre fibra, esta red está diseñada para ser utilizada en las frecuencias de 5g, las cuales según el último informe de la agencia nacional de espectro (ANE) se disponen los rangos de 24,25 GHz y 86 GHz generando beneficios a la transmisión de imágenes diagnósticas como: MBB (banda ancha móvil mejorada) y URLLC (comunicaciones de baja latencia ultra confiables). Por lo tanto, los siguientes son los elementos más importantes en la descripción de 5G: alto rendimiento, baja latencia, alta confiabilidad, mayor escalabilidad y tecnología de comunicación móvil eficiente en energía.

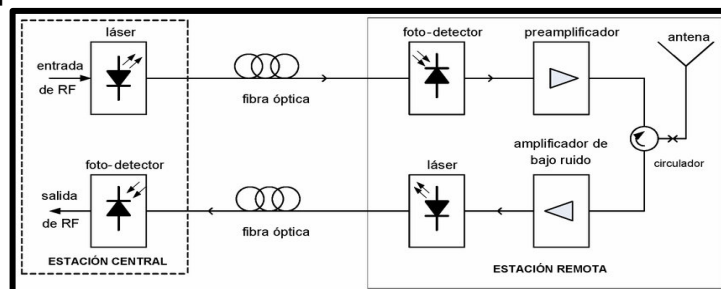
1.6. MARCO DE REFERENCIA

Con respecto a lo mencionado anteriormente, durante el desarrollo del trabajo de grado fue necesario conocer conceptos y teorías sobre el sistema radio sobre fibra, transmisión de imágenes, fibra óptica, entre otros; a continuación, se presentan los conceptos principales que se tuvieron en cuenta durante la investigación.

1.6.1. MARCO TEÓRICO

1.6.1.1. Radio Sobre fibra. Este sistema tiene como principal función transportar la información a través de la fibra óptica mediante la modulación de la señal de luz con una señal de radio⁴². Como se observa en la Figura 5 consta de una estación central, una estación remota o también llamada estación base y un canal de comunicación.

Figura 5. Componentes de un sistema RoF



Fuente: ARVIZU, Arturo, et al. Sistema básico de radio sobre fibra óptica (RoF). [imagen]. Foto-transceptor para sistemas RoF y RoFSO usando un mezclador optoelectrónico basado en PHEMT. México. 2012. 340 p. [Consultado: 12 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yayf8h3a>

⁴² D. Wake et al., "Radio over Fiber for Mobile Communications," in *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics - Technical Digest, MWP*, 2004, p. 157–159, <https://doi.org/10.1109/mwp.2004.1396863>.

1.6.1.2. Estación de control: Se encarga de alimentar todas las estaciones de base dentro de una región transmitiendo señales ópticas por fibra que contienen los datos deseados y las portadoras de frecuencias requeridas. En la línea de transmisión óptica es necesario amplificar las señales para compensar las pérdidas de los divisores de potencia y, por ello, se ha incluido los amplificadores ópticos fibrados dopados de erbio⁴³.

1.6.1.3. Estación base: El sistema de estaciones base es responsable de garantizar todo lo relacionado con el correcto funcionamiento de la señal de radio. Es su responsabilidad lograr que el sistema de conmutación se abstraiga de los problemas relacionados con la atención al móvil. El sistema de estaciones base consiste en una colección de transmisores conocidos como transceptores de Estación Base (BTS, Base Transceiver Stations), o simplemente estaciones base. Cada BTS es el centro de una celda y emite señales de radio a los móviles cercanos⁴⁴, del mismo modo que es capaz de escuchar sus respuestas. A pesar de su capacidad dual, muchos autores se refieren simplemente a las BTS como transmisores.

1.6.1.4. Sistema SDR (radio definida por software): Es un sistema de comunicación por radio en el que los componentes que normalmente se han implementado en hardware (p. Ej., Mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores / demoduladores, detectores) se implementan en su lugar utilizando software en una computadora personal u otros dispositivos informáticos integrados. Como resultado, se transforman los problemas de hardware de radio en problemas de software. La característica fundamental de la radio de software es que el software define las formas de onda transmitidas y el software demodula las formas de onda recibidas. Esto contrasta con la mayoría de las radios, en las que el procesamiento se realiza con circuitos analógicos o circuitos analógicos combinados con chips digitales⁴⁵.

1.6.1.5. Atenuación de la fibra óptica. En una red óptica, existen múltiples componentes pasivos, como multiplexores de adición y caída, filtros, divisores y acopladores, cuyas pérdidas de inserción reducen la potencia de la señal. Por lo

⁴³ Gabriel Campuzano, "Transferencia," Tecnológico de Monterrey, July, p. 1, <https://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferencia/67/67-III.03.html>

⁴⁴ Jimmy Arreaga Ojedis, Irene; Vera Morocho, "ESTUDIO Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE BAJO COSTO PARA EMERGENCIAS UTILIZANDO SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR) Y SERVIDOR ASTERISK PARA APLICACIONES EN SITIOS DE BAJA COBERTURA" (Guataquil, August 2019), p. 11, <https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18074/1/UPS-GT002834.pdf>.

⁴⁵ Iván; Fuentes Murillo, Juan Pinar Domínguez, "Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida Por Software," 2011, p. 11-14, <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/LibroSDRV7USv8.pdf>.

tanto, se requieren amplificadores ópticos a intervalos regulares para mantener una potencia de señal adecuada a lo largo del enlace de transmisión⁴⁶.

1.6.1.6 La adquisición de datos de imágenes médicas. generalmente no es el primer paso en un proceso de diagnóstico; antes se realizaron unos pasos previos como son los siguientes. Anamnesis o historial médico el cual consiste en evaluar al paciente, teniendo en cuenta también las enfermedades o accidentes previos, los hábitos del paciente y las enfermedades que han ocurrido en la familia, como segundo paso, procedimientos de diagnóstico simples, como palpación, auscultación con un estetoscopio o mediciones de la presión arterial., por ultimo y como diagnóstico adicional se realizan pruebas clínicas, donde se analizan los líquidos del cuerpo, como la sangre y la orina⁴⁷.

Una vez se realiza el anterior procedimiento y si aun el médico presenta dudas sobre la enfermedad se utiliza el análisis de imágenes, la adquisición e interpretación de la imagen está dedicada a decidir si la sospecha se puede confirmar o excluir. Por lo tanto, es esencial que la información relevante del diagnóstico se encuentre disponible para el radiólogo. Por esta razón se debe desarrollar registros médicos electrónicos, junto con sistemas de información hospitalaria, que representen esta información y que se pueda compartir con buena calidad y su lectura sea en el menor tiempo posible⁴⁸.

1.6.1.7. El procesamiento de imágenes. Es la aplicación de un conjunto de técnicas y algoritmos a una imagen digital para analizar, mejorar u optimizar características de la imagen, como la nitidez y el contraste. Por otra parte, los algoritmos de procesamiento que normalmente deben realizarse para la captura completa de imágenes se pueden clasificar en métodos de bajo nivel, como la eliminación de ruido y nitidez del color, nivel medio como la compresión y la binarización, y métodos de nivel superior que implican segmentación, detección, y los algoritmos de reconocimiento extraen información semántica de los datos capturados⁴⁹.

1.6.1.8. Imagen digital y comunicaciones en medicina (DICOM). Es el estándar más ampliamente adoptado en el mundo para el intercambio y la gestión de imágenes médicas. Desde la presentación de DICOM en 1993, los proveedores han podido utilizar imágenes totalmente digitales con alta resolución en lugar de

⁴⁶ Luis Aguilera Arreaga, "Análisis Comparativo Del Rendimiento de Los Moduladores MachZehnder y Electroabsorción Para Comunicaciones Ópticas" (Guayaquil, September 24, 2018), p. 46, <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11146/1/T-UCSG-POS-MTEL-111.pdf>.

⁴⁷ Andrés; Carnicero, Javier Fernández, "Manual de Salud Electrónica," January 2012, p. 98-114, https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3023/1/S2012060_es.pdf.

⁴⁸ Bernhard Preim et al., "An Introduction to Medical Visualization in Clinical Practice," *Visual Computing for Medicine*, January 1, 2014, p. 69–110, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415873-3.00003-1>

⁴⁹ Paul S. Ganney, Sandhya Pisharody, and Edwin Claridge, "Software Engineering," *Clinical Engineering*, January 1, 2014, p. 133–70, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396961-3.00009-3>

películas físicas de rayos X. Con DICOM, las imágenes generadas por diferentes tipos de dispositivos de imágenes médicas (p. Ej., Rayos X, tomografía computarizada, resonancia magnética, ultrasonido) pueden integrarse en los sistemas de archivo y comunicación de imágenes (PACS) y pueden intercambiarse en redes HIE. El estándar DICOM no solo codifica la imagen sino también un conjunto de metadatos y atributos que describen la imagen y pueden ser utilizados por otras aplicaciones en la prestación de asistencia sanitaria⁵⁰.

1.6.2. MARCO CONCEPTUAL.

Debido a la importancia de la telemedicina y el auge que presenta desde sus inicios es necesario abordar este tema con el fin de conocer en que consiste y sus aplicaciones. Además, de resaltar conceptos claves que acompañan el trabajo de grado como los siguientes:

1.6.2.1. Telemedicina. Es cualquier acto médico realizado sin contacto físico directo entre el profesional y el paciente, o entre profesionales entre sí, por medio de algún sistema telemático. En otras palabras, la telemedicina utiliza las tecnologías de la información y las telecomunicaciones (por medio de los sistemas telemáticos) para proporcionar o soportar la asistencia médica, independientemente de la distancia que separa a los que ofrecen el servicio⁵¹.

1.6.2.2. La radiografía. Es un procedimiento utilizado tanto clínica como industrialmente para obtener información no destructiva sobre la estructura interna de los objetos. Si bien la interpretación anatómica de las radiografías clínicas no es importante aquí, esa interpretación depende en última instancia de la interacción de la radiación con la materia, tanto en el objeto que se investiga como en el medio de grabación. Eso lleva a la radiografía firmemente dentro del ámbito de la ciencia de los materiales. Por lo tanto, se considera importante que estas interacciones se consideren como un complemento para comprender el proceso de interpretación, especialmente dado que los materiales no biológicos estarán frecuentemente presentes en el campo, por ejemplo, si se ha realizado algún tratamiento restaurador previo⁵².

1.6.2.3. Amplificador óptico. Los amplificadores ópticos funcionan de manera similar a los láseres, es decir, bombeando un medio de ganancia, que está hecho de una fibra dopada con erbio, como resultado del bombeo, los electrones en el medio de ganancia saltan a estados de mayor energía. Estos electrones son

⁵⁰ Masoud Hosseini, "Syntactic Interoperability and the Role of Standards," *Health Information Exchange*, January 1, 2016, p. 123–36, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803135-3.00008-6>

⁵¹ Karim Nader, "Qué Es La Telemedicina," 2011, p. 1, <http://www.elhospital.com/temas/Que-es-la-telemedicina+8082249>

⁵² B.W. Darvell and B.W. Darvell, "Radiography," *Materials Science for Dentistry*, January 1, 2018, p. 665–668, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101035-8.50026-2>

estimulados por los fotones de una señal óptica entrante para saltar a un estado de menor energía, mientras liberan un fotón de las mismas características que el de la señal entrante. Por lo tanto, el fotón recién generado tendrá la misma fase, polarización y dirección de movimiento que el fotón incidente y da como resultado un aumento en la potencia de la señal de entrada óptica. La longitud de onda de la luz emitida cuando un electrón salta de un estado de energía más alto al más bajo depende del material utilizado para dopar la fibra. Para el dopaje con erbio, esta longitud de onda se encuentra en la región que abarca desde 1525 nm hasta 1570 nm, que coincide con la región de longitud de onda donde se demostró que la atenuación de la fibra es la más baja. Por lo tanto, Erbium es un dopante adecuado para amplificadores utilizados en comunicaciones ópticas. Siendo el amplificador óptico EDFA más común utilizado en los sistemas de comunicación óptica⁵³.

1.6.2.4. Transmisor óptico. La función básica de un transmisor óptico es convertir una señal electrónica en una señal óptica, por lo tanto, realizar la conversión EO. El componente principal de un transmisor óptico es la fuente de luz llamada láser. Los láseres semiconductores se usan comúnmente como fuentes ópticas para la conversión EO. Tienen muchas ventajas que incluyen bajo costo, tamaño pequeño, confiabilidad e idoneidad para señales eléctricas de alta frecuencia (hasta 25 GHz) cuando se modulan directamente⁵⁴

1.6.2.5. Modulador Mach-Zehnder (MZM). El modulador Mach-Zehnder es el modulador más popular y puede clasificarse como Modulador Mach-Zehnder de unidad única y Modulador Mach-Zehnder de doble unidad. La onda óptica entra desde el lado de entrada y luego se divide por igual en sus dos brazos. La estructura del MZM de doble accionamiento tiene dos brazos y electrodos. El modulador Mach-Zehnder se usa para controlar la amplitud de una onda óptica. La guía de onda de entrada se divide en dos brazos de interferómetro de guía de onda y se aplica polarización a estos brazos. Se induce un cambio de fase en la onda que pasa a través del brazo, debido al voltaje aplicado. La señal óptica que viaja a través de ambos brazos del interferómetro se recombina a la salida de MZM y la diferencia de fase entre las dos ondas se convierte en una señal modulada en amplitud⁵⁵.

⁵³Salman Ghafoor, "(PDF) Radio over Fiber Systems," June 2012, p. 1, https://www.researchgate.net/publication/299463915_Radio_over_fiber_systems

⁵⁴ Aguilera Arreaga, "Análisis Comparativo Del Rendimiento de Los Moduladores MachZehnder y Electroabsorción Para Comunicaciones Ópticas", Op. Cit., p. 20.

⁵⁵ Josep Maria Fàbrega, "Sistemas Ópticos de Transmisión," accessed May 30, 2020, p. 9-11, http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/76208/5/Sistemas_de_comunicación_ópticos_Módulo_3_Sistemas_ópticos_de_transmisión.pdf.

1.6.2.6. Modulación directa. la técnica de modulación directa, que también se conoce como modulación de intensidad (IM), modula directamente la amplitud del haz láser de acuerdo con la señal de entrada de RF⁵⁶.

1.6.2.7. Modulación externa. Este tipo de modulación consiste en pasar ondas de luz a través de una guía de onda, que cambia sus propiedades de refracción y varía la fase de la onda al inducir un campo eléctrico, con lo cual se puede modular la intensidad de la misma, es ideal para transmisores de bajo costo y causa una dispersión cromática excesiva a altas velocidades⁵⁷.

1.6.2.8. Transmisión de imágenes médicas. El proceso de transmisión de las imágenes se realiza a consecuencia de una solicitud enviada por una estación de trabajo, así el sistema le envía las imágenes a la estación solicitante, consecuente con la petición realizada por la misma, la que contiene los datos de los pacientes y el estudio que se le realizó. De este modo se hace posible, en los hospitales o clínicas radiológicas donde esté instalado el sistema, que todo aquel equipo médico de adquisición de imágenes que posea al menos una estación de post-procesamiento o de visualización, pueda efectuar tareas de: visualización, envío de imágenes al sistema, búsqueda de pacientes en el sistema u obtención de las imágenes de un determinado paciente⁵⁸.

1.6.2.9. Fibra óptica. La tecnología de fibra óptica, desarrollada en los años sesenta y setenta, hizo posible la fabricación de fibras de vidrio finas, altamente flexibles y de baja pérdida que pueden transportar luz a largas distancias. Una fibra óptica típica es sobre 10µm de diámetro y está hecho de vidrio de sílice de alta pureza. La fibra está recubierta con un revestimiento para aumentar la captura de luz. Dichas fibras pueden transportar luz sobre caminos retorcidos durante varios kilómetros sin pérdidas significativas⁵⁹.

1.7. MARCO LEGAL

En cuanto a términos legales el estado colombiano cuenta con reglamentación para la telemedicina, a continuación, se encuentran las normas y leyes a las que se rige la investigación:

⁵⁶ Andrés Felipe Escallón-Portilla and Víctor Hugo Ruiz-Guachetá, "Evaluación Del Desempeño Físico de Un Sistema FTTH-GPON Para Servicios Quad Play Después de La Incorporación de Un Módulo RoF," *Tecnológicas* 23, no. 47 (Enero 30, 2020), p. 6, <https://doi.org/10.22430/22565337.1391>.

⁵⁷ P Jimenez, "TÉCNICAS DE MODULACIÓN ÓPTICA CON DISPOSITIVOS ELECTRO-OPTICOS," accessed May 30, 2020, p. 66, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/jimenez_p_jl/capitulo4.pdf.

⁵⁸ Denys Guzmán, Carlos; Vega, "Sistema Para El Almacenamiento y Transmisión de Imágenes Médicas, Versión 3.0," June 2014, p. 1, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18592014000100003

⁵⁹ Jaime Zapardiel Prieto, "DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO MEDIANTE FIBRA ÓPTICA," June 2014, p. 6, http://oa.upm.es/33869/1/PFC_jaime_prieto_zapardiel.pdf.

Ley 1419 de 2010. “tiene por objetivo desarrollar la TELESALUD en Colombia, como apoyo al Sistema General de Seguridad Social en Salud, bajo los principios de eficiencia, universalidad, solidaridad, integralidad, unidad, calidad y los principios básicos contemplados en la presente ley”⁶⁰.

Todos ellos hacen parte de los principios de la telesalud del Artículo 3°. “En los términos definidos por el artículo 2° de la Ley 100 de 1993. Así mismo, constituye uno de los principios de la misma la calidad de la atención de salud, entendida como la provisión de servicios de salud a los usuarios individuales y colectivos de manera accesible y equitativa, a través de un nivel profesional óptimo, teniendo en cuenta el balance entre beneficios, riesgos y costos, con el propósito de lograr la adhesión y satisfacción de dichos usuarios”⁶¹.

Ley 527 de 1999. “Por medio de la cual se define y reglamenta el acceso y uso de los mensajes de datos, del comercio electrónico y de las firmas digitales”. Por otro lado, la Ley 1341 del 2009. “Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones TIC, se crea la Agencia Nacional del espectro y se dictan otras disposiciones”. Por consiguiente, la Ley 1273 de 2009. “Por medio de la cual se modifica el código penal, se crea un nuevo bien jurídico tutelado denominado de la protección de la información y de los datos y se preservan integralmente los sistemas que utilicen las tecnologías de la información y las comunicaciones”. Por último, Ley 1266 del 2008. “Por la cual se dictan las disposiciones generales del “hábeas data” y se regula el manejo de la información contenida en bases de datos personales, incluidos los servicios de salud y especifica que los datos personales no pueden ser transmitidos ni compartidos sin consentimiento del cliente”⁶².

1.8. METODOLOGÍA

Partiendo del planteamiento del problema, en este apartado se encontrarán las etapas en que se divide el trabajo de grado organizándolas respecto a los objetivos a alcanzar, para ello se eligió el método científico como método de investigación, que se basa en la observación, hipótesis, experimentación y resultados obtenidos⁶³. A continuación, cada una de las etapas:

⁶⁰ Egna: Moncalenano, John Viveros, “PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE LA POLITICA PÚBLICA LEY 1419 DE TELESALUD COMO FACTOR DE INCLUSIÓN SOCIAL EN EL CORREGIMIENTO NÚMERO TRES ZONA RURAL DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA,” universidad icesi , 2016, p. 31, https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/80089/1/T00468.pdf

⁶¹ “Ley 1419 de 2010 - EVA - Función Pública,” December 13, 2010, p. 1, <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40937>

⁶² *Ibid.*, p. 5.

⁶³Victor Delgado, “El Método Científico,” September 5, 2016, p. 1, <https://www.alucianante.com/index.php/blog/14-el-metodo-cientifico>.

Etapa 1

- Reunir información en diferentes bases de datos sobre telemedicina, imágenes diagnósticas y tecnología de radio sobre fibra.
- Realizar un estado del arte con los artículos seleccionados conforme a sus resultados, aportes y análisis bibliométrico con el software Vosviewer.
- Generalizar el contexto del problema y las características que presentan las imágenes médicas en cuanto a tamaño, pixeles y calidad.
- Plantear la hipótesis de investigación.

Etapa 2

- Seleccionar información sobre las características físicas de una imagen para telediagnóstico.
- Comparar la información de las características físicas de las imágenes para telediagnóstico con las características físicas que debe tener una imagen diagnóstica para patologías cardiorrespiratorias en neonatos.
- Explicar cada una de las fórmulas que se utilizan para conocer el tamaño, número de pixeles y resolución de una radiografía digital.
- Verificar las características de la imagen que se va a transmitir en cuanto a tamaño pixeles y resolución a partir de la información recolectada sobre las imágenes para telediagnóstico.

Etapa 3

- Clasificar los tipos de arquitectura comúnmente usados para los sistemas de radio sobre fibra.
- Realizar el esquema general del enlace radio sobre fibra.
- Seleccionar el software para el enlace radio y el software para el enlace radio sobre fibra óptica.
- Identificar las características de cada software seleccionado.
- Relacionar y describir cada uno de los componentes utilizados para la simulación.
- Comprobar la transmisión de la imagen en el enlace radio y la señal en el enlace de radio sobre fibra óptica.
- Realizar una gráfica con los datos obtenidos de la velocidad de transmisión y tasa de error de bits.

Etapa 4

- Analizar los resultados de la tasa de error de bits para cada data rate.
- Establecer el data rate con menor número de pérdidas del enlace radio sobre fibra para posteriormente variar la distancia.

- Comparar los resultados obtenidos con diferentes distancias y determinar el alcance máximo de transmisión.

2. IMAGENES PARA TELEDIAGNÓSTICO

2.1 IMÁGENES DIAGNÓSTICAS

Las imágenes médicas como las radiografías digitales presentan las siguientes características físicas:

2.1.1. Pixel. Las imágenes digitales están conformadas por una matriz de píxeles que se reparten en filas y columnas. Donde a cada píxel se le asigna un valor tonal (negro, blanco, tonos de gris o color), que se representa en código binario (ceros y unos). Cada píxel contiene información de color, saturación y brillo y no tiene un tamaño determinado (cada dispositivo de captura emplea píxeles de distinto tamaño). Es así como el mejor indicador del tamaño de imagen es sencillamente la cantidad de píxeles que la forman⁶⁴ (ver ecuación 1).

$$\text{Tamaño en píxeles de una imagen digital} = m \times n \quad (1)$$

Donde, m corresponde a el número de columnas y n a el número de filas. Por ejemplo, si una imagen digital consta de un tamaño de 400 x 300, significa que la imagen presenta 400 columnas y 300 filas de píxeles. Lo que indica que su tamaño en píxeles es de 120.000 píxeles.

Cabe resaltar, que conociendo el tamaño de píxeles de una imagen y su resolución ppp (puntos por pulgada) se puede encontrar el tamaño de la imagen en cm (ver ecuación 2).

$$\text{Tamaño de una imagen (cm)} = \frac{\text{tamaño en píxeles} \times 2,54}{\text{resolución en ppp}} \quad (2)$$

2.1.2. Escala de grises. Las imágenes en escala de grises son diferentes de "blanco y negro" imágenes a diferencia del último, que tiene dos colores (negro, blanco), las imágenes en escala de grises tienen varios tonos de gris entre estos tonos de gris que componen una imagen, van del negro puro a tonos más débiles de negro hasta llegar al blanco en su tono más puro.

Para determinar la cantidad de tonos de grises que contiene una imagen se hace por medio de los bits de profundidad que son aquellos bits que contienen la cantidad

⁶⁴ Jose Barros, "Tamaño de Imagen, Resolución y Dimensiones | Jota Barros," accessed May 21, 2020, p. 1, <https://jotabarros.com/aprende-fotografia-tamano-imagen-resolucion-tamano-fisico/>.

de información binaria que conforma una gama de tonalidades que poseerá la imagen digital, ya sea en color o en blanco y negro (ver ecuación 3).

$$\text{Tonos de grises} = 2^n \quad (3)$$

Donde n representa al número de bits de profundidad

A continuación, se observa en la Tabla 2 la cantidad de tonos representados por profundidades de bits más comunes.

Tabla 2. Cantidad de tonos de una imagen digital

No. Bits de profundidad	Tonos de grises
3	$2^3 = 8$
4	$2^4 = 16$
8	$2^8 = 256$
12	$2^{12} = 4096$
14	$2^{14} = 16.384$
16	$2^{16} = 65.536$
24	$2^{24} = 16.777.216$

Fuente: Autor

Cabe destacar que las imágenes en radiología producidas por detectores de rayos X como: tomografías computarizadas, radiografías, etc., contienen 16 bits/píxel como se observa en la Tabla 3, mientras que las imágenes visualizadas por pantallas médicas en general como las ecografías, tienen un número menor de 8 bits/píxel.

Tabla 3. Características de las imágenes diagnósticas

No	Modalidad	Tamaño de matriz de imagen (en píxeles)	Rango dinámico (bits por píxel)	Tamaño de archivo típico por imagen
1	Radiografía computarizada	256 x 256	16	131 KB
2	Tomografía computarizada	512 x 512	16	524 KB
3	Ecografía	512 x 512	8	262 KB
4	Ecografía Doppler	768 x 576	8	442 KB
5	Radiografía digital (GE)	2022 x 2022	16	8 MB
6	Mamografía digital de campo completo (GE) 19 x 23 cm	1914 x 2294	16	9 MB
7	Radiografía digital (Canon, Agfa)	2688 x 2688	16	14.4 MB
8	Radiografía digital (Philips, Siemens)	3000 x 3000	16	18 MB
9	Mamografía digital de campo completo (Siemens) 24 x 29 cm	3328 x 4096	16	27 MB
10	Radiografía Computarizada (Fuji HR) 35 x 43 cm	3520 x 4280	16	30 MB
11	Mamografía de radiografía computarizada (Fuji) HPD 24 x 30 cm	3540 x 4740	16	33.5 MB

Fuente: INDRAJIT, Ik, et al. Tamaños de imagen en la práctica de radiología. [en línea]. Imagen digital en la práctica de radiología: una introducción a algunos conceptos fundamentales. 2007. 234 p. [Consultado: 4 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yckxsfqr>

2.1.3. Color. Mientras que, la mayor parte de la práctica de la radiología se lleva a cabo en escala de grises, hay una tendencia creciente hacia el uso de color, como es el caso de tomografía computarizada (CT), estudios de resonancia magnética (MRI) y, en particular durante el procesamiento posterior.

Un modelo de color llamado RGB (rojo, verde, azul) se basa en la presencia de una fuente de luz para la creación de la imagen, el modo CMYK (Cian, amarillo, magenta, negro) se basa en la creación de la imagen en una superficie reflectante como el papel, En un monitor de ordenador, para la visualización de una imagen en blanco y negro simple, sólo se necesita 1 bit para cada píxel. Sin embargo, para la visualización de imágenes en color en los monitores de color, tarjetas de video de PC de apoyo hay 24 bits para cada píxel, lo que resulta en una pantalla 16.777.216 colores⁶⁵.

⁶⁵ B. S Indrajit, I. K.; Verma, "Digital Imaging in Radiology Practice: An Introduction to Few Fundamental Concepts.," 2007, p. 231, <https://doi.org/10.4103/0971-3026.36866>

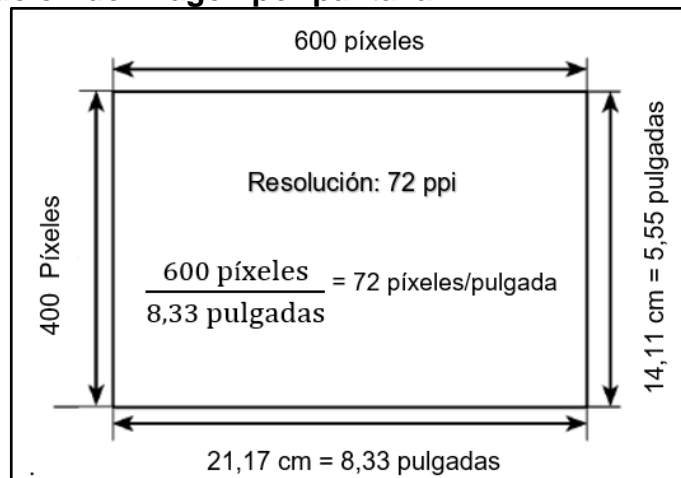
2.1.2. Resolución. La resolución de una imagen se mide por el número de píxeles o puntos por unidad de tamaño impreso en la imagen. Cuando se habla de imágenes de pantalla, la resolución se indica en píxeles por pulgada (ppi), y cuando se habla de imágenes impresas, se indica en puntos por pulgada (ppp)⁶⁶.

Para determinar la cantidad de píxeles por pulgada que posee una imagen, depende del equipo y tipo del modelo, es decir, “la resolución de una imagen es función exclusivamente del dispositivo de salida”. A continuación, se presenta la fórmula que determina la resolución de una imagen digital, mostrada en pantalla (Ver ecuación 4).

$$\text{Resolución(ppi)} = \frac{\text{Ancho de la pantalla (píxeles)}}{\text{Ancho de la pantalla (pulgadas)}} \quad (4)$$

Para ello se requiere del ancho de la pantalla en píxeles como se observa en la Figura 6, siendo 1 pulgada igual a 2,54cm. Resaltando entre mayor sea la resolución “implica más píxeles por unidad de longitud, lo que quiere decir que el nivel de detalle es mayor”⁶⁷.

Figura 6. Resolución de imagen por pantalla



Fuente: FERNÁNDEZ, Ramón. Píxeles [Imagen]. Píxeles y resolución | Apuntes de Informática. S.f. 1 p. [Consultado: 17 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y7dt3tmp>

2.1.4. Resolución espacial. La resolución espacial se refiere a la finura de detalles visibles en una imagen: cuanto menor es el área representada por cada píxel en una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la

⁶⁶ CEVAGRAF IMPRENTA, “Cómo Calcular La Resolución de Una Imagen,” January 11, 2015, p. 1, <https://www.cevagraf.coop/blog/calculadora-de-resolucion/>.

⁶⁷ Barros, “Tamaño de Imagen, Resolución y Dimensiones | Jota Barros”, Op. cit., p. 1.

resolución espacial⁶⁸. En términos generales, existen diferentes factores que influyen en la resolución espacial como: a) aumentar la frecuencia de muestreo ayuda a aumentar la resolución b) las imágenes compuestas con un mayor número de píxeles tienen una resolución espacial más alta⁶⁹.

2.1.5. Resolución de contraste. “Este término se refiere a la capacidad de un sistema digital de mostrar sutiles cambios en la escala de grises que existe en una imagen. Una resolución de contraste alta quiere decir que las diferencias entre densidades adyacentes van a ser aumentadas, esto quiere decir que se mostrarán más niveles de grises resultando en la habilidad de diferenciar pequeños cambios en densidades”⁷⁰. La resolución de contraste es particularmente un problema durante la obtención de imágenes de objetos inherentemente de bajo contraste como masas mamarias y nódulos pulmonares. Para equipos de adquisición de imágenes digitales, esto significa el número de tonos de gris que un detector puede capturar.

En la práctica, los detectores de equipos digitales de rayos X tienen ventajas significativas sobre las imágenes convencionales de película / pantalla. Debido a su amplio rango dinámico, se puede capturar un amplio rango de intensidades de señal de baja a alta y debido a su alta resolución de contraste, se pueden mostrar miles de tonos de gris.

2.1.6. El tamaño del archivo. Es el resultado final, que indica el tamaño de los datos de información que representan una imagen. Es una relación matemática que integra el número total de píxeles en una imagen con escala de grises o profundidad de color. El tamaño del archivo depende esencialmente de las dimensiones de los píxeles y la profundidad de bits. Predeciblemente, se deriva multiplicando el (número de píxeles horizontales), (número de píxeles verticales) y (número de bits en tonos de gris o color, es decir, profundidad de bits)⁷¹, (ver ecuación 5). Por otra parte, si se desea conocer el tamaño de un documento que guarda una determinada cantidad de imágenes basta con multiplicar la ecuación 5 por el número de imágenes que contiene el archivo.

$$Tamaño = \frac{M * N * P}{8} \quad (5)$$

Donde:

⁶⁸ Teledet, “La Resolución Espacial,” accessed May 21, 2020, p. 1, <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-espacial.htm>.

⁶⁹ *Ibíd.*, p. 1.

⁷⁰ Emanuel; Rodríguez, “Introducción a La Imagen Digital En Radiología - Imagenología,” June 26, 2014, p. 1, <https://imagenologia.robustiana.com/20-introduccion-a-la-imagen-digital-en-radiologia>.

⁷¹Platea, “Imagen Digital: Conceptos Básicos,” accessed April 17, 2020, p. 1, <http://platea.pntic.mec.es/~lgonzale/tic/imagen/conceptos.html>.

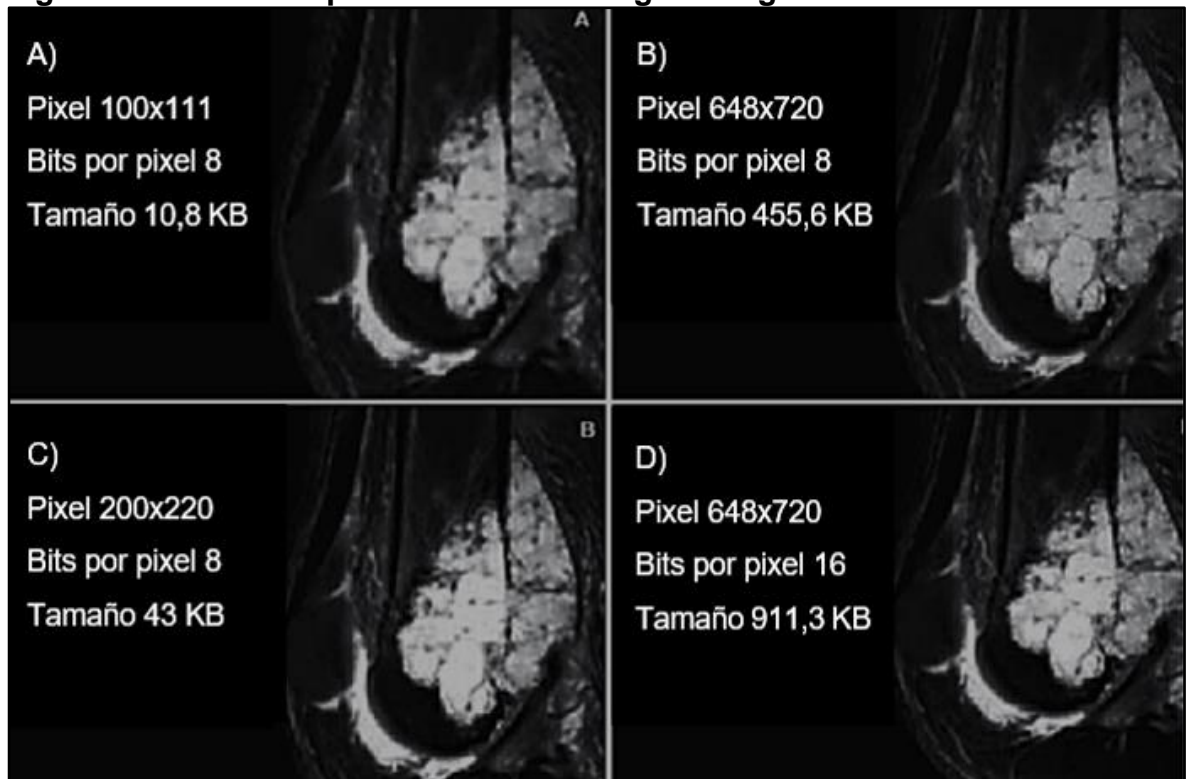
M: Largo de la imagen (en pixeles)
N: Ancho de la imagen (en pixeles)
P: Bits de profundidad

Partiendo de la anterior formula se puede decir que el tamaño del archivo de una imagen que presenta las dimensiones de 100 x 111 pixeles y 8 bits de profundidad (ver Figura 7), cuenta con el siguiente tamaño (ver ecuación 6). Cabe resaltar que las imágenes con mayor resolución requieren tamaños de archivo más grandes.

$$Tamaño = \frac{100 * 111 * 8}{8} = 11,1 \times 10^3 \quad (6)$$

$$Tamaño = \frac{11,1 \times 10^3}{1024} = 10,8 \text{ KB}$$

Figura 7. Tamaño de pixeles en una radiografía digital.



Fuente: INDRAJIT, Ik, et al. Resolución y tamaño de archivo en un caso de sarcoma de fémur de Ewing. [Imagen]. Imagen digital en la práctica de radiología: una introducción a algunos conceptos fundamentales. 2007. 232 p. [Consultado: 4 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yckxsfqr>

Por otra parte, dadas las características que componen una imagen digital en cuanto a tamaño en píxeles y tamaño de archivo, se pueden clasificar de la siguiente manera:

Según su tamaño en píxeles:

- Grande cuando tiene un tamaño igual o mayor a 1024x768 píxeles,
- Mediana cuando el tamaño va de 320x240 a 1024x768 píxeles,
- Pequeña cuando el tamaño es menor a 320x240 píxeles y
- Muy pequeña cuando es menor a 100x100 píxeles⁷².

Según el tamaño del archivo:

- Pesada si tiene 1 MB o más,
- De peso mediano si va de 300 KB a 1 MB,
- Ligera si su peso es menor de 300 KB y
- Muy ligera si el peso es inferior a 100KB.

Cabe resaltar que, “la unidad básica de almacenamiento de información es el byte, equivalente 1 byte a ocho bits. Por lo que los prefijos kilo, mega, giga, etc. se consideran potencias de 1024”⁷³. (ver Tabla 4), ya que al ser un sistema binario solo se obtiene potencias de 2, siendo 1024 el número que más se acerca a 1000 bytes (1 kilo).

Tabla 4. Unidades de medida de la información

Medida	Equivalencia
1 KB (Kilobytes)	1024 B (Bytes)
1 MB (Megabytes)	1024 KB (Kilobytes)
1 GB (Gigabytes)	1024 MB (Megabytes)
1 TB (Terabytes)	1024 GB (Gigabytes)

Fuente: Autor.

⁷²Aprende tic, “Tamaño y Peso de Las Imágenes,” accessed April 27, 2020, p. 1, <https://sites.google.com/site/ticvalcarcel/optimizacion-de-imagenes-para-internet/tamano-y-peso-de-las-imagenes>.

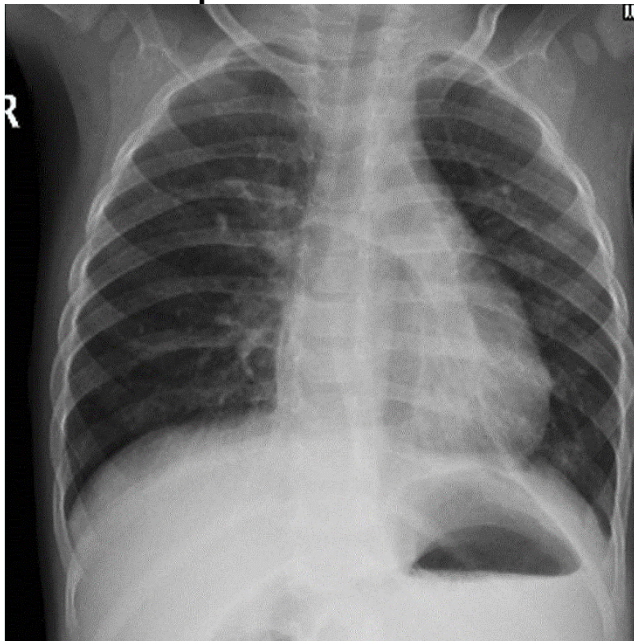
⁷³Adimen, “INFORMÁTICA BÁSICA LIBRE CONFIGURACIÓN II, ITIG E ITIS,” accessed April 29, 2020, p. 4-5, https://adimen.si.ehu.es/~rigau/teaching/EHU/ISHAS/AltresCursos/Jaumel/Tema2_06-07.pdf.

2.2 IMÁGENES CARDIORRESPIRATORIAS

Para detectar una enfermedad cardiorrespiratoria casi siempre se utiliza una radiografía de tórax (ver Figura 8), la cual proporciona “un perfil definido del corazón y de los vasos sanguíneos, lo que permite, por lo general, detectar un trastorno grave en los pulmones, en los espacios adyacentes y en la pared torácica, incluyendo las costillas”⁷⁴. Por otra parte, es necesario mencionar que en un neonato generalmente la longitud de su tórax se encuentra en un rango de 20cm y 25cm según su tabla antropométrica⁷⁵.

Además, otra ventaja que se encuentra es que “con una radiografía de tórax se pueden visualizar la mayoría de patologías cardiorrespiratorias como: las neumonías, los tumores pulmonares, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), el colapso pulmonar (atelectasia) y la acumulación de aire (neumotórax) o de líquido (derrame pleural) en la cavidad pleural”⁷⁶.

Figura 8: Radiografía de tórax para examen de neumonía de un neonato



Fuente: MOLINA, Miralles, et al. Radiografía de tórax en proyección anteroposterior. [imagen]. Lactante con lesiones cutáneas y dificultad respiratoria. 2015. 1 p. [Consultado: 24 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y9wdqs8c>

⁷⁴ Rebecca; Hopkins, Johns Dezube, “Radiografías de Tórax - Trastornos Del Pulmón y Las Vías Respiratorias - Manual MSD Versión Para Público General,” July 2019, p. 1, <https://www.msmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-pulmón-y-las-vías-respiratorias/diagnóstico-de-los-trastornos-pulmonares/radiografías-de-tórax>.

⁷⁵ Diana Ariza, “Tabla de Medidas Bebes Linea Primera Infancia Noe | Tabla de Medidas, Trajes Para Bebes, Medidas Antropometricas,” accessed May 11, 2020, p. 1, <https://www.pinterest.es/pin/484770347368096395/>.

⁷⁶ Dezube, “Radiografías de Tórax - Trastornos Del Pulmón y Las Vías Respiratorias - Manual MSD Versión Para Público General”, Op. cit., p. 1.

La anterior figura presenta el equivalente a una matriz de datos de 4096x4096 pixeles, cuenta con 16 bits de profundidad para un total de 65.536 tonos de grises, (ver ecuación 7) y ocupa un tamaño de archivo de 32 MB, (ver ecuación 8). Es importante resaltar que en la modalidad de radiografía digital las resoluciones inferiores a 1024x1024 pixeles son insuficientes para uso rutinario en el diagnóstico de imágenes cardiorrespiratorias⁷⁷.

$$\text{Tonos de grises} = 2^{16} = 65.536 \quad (7)$$

$$\text{Tamaño} = \frac{4096 * 4096 * 16}{8} = 33,6x10^6 \text{ Bytes} \quad (8)$$

$$\text{Tamaño} = \frac{33,6x10^6}{1024} = 32,8x10^3 \text{ KB}$$

$$\text{Tamaño} = \frac{32,8x10^3}{1024} = 32 \text{ MB}$$

Por otra parte, como lo indica el instituto nacional de salud “las imágenes médicas constituyen una de las fuentes de mayor importancia, por cuanto ofrecen un apoyo integral del acto médico: el diagnóstico y el seguimiento. Sin embargo, la cantidad de información generada por los dispositivos de adquisición de imágenes sobrepasa rápidamente la disponibilidad de almacenamiento que tienen los servicios de radiología, lo cual genera costos adicionales en equipos de cómputo con mayor capacidad de almacenamiento”⁷⁸. Es por esta razón que se requiere comprimir las imágenes como es el caso del formato JPEG (basado en la transformación discreta de coseno) ya que dentro de sus ventajas se encuentra su capacidad de mantener una buena calidad tras la compresión, la imagen puede ser comprimida hasta 100 veces y es compatible con otros dispositivos⁷⁹.

Finalmente, en este capítulo la imagen seleccionada fue una radiográfica de tórax comprimida en un formato JPEG debido a que es un formato universal, con ventajas por ser el archivo más utilizado para imágenes diagnósticas. Además, que en este formato la imagen se encuentra lista para imprimirse. Obteniendo después de la compresión un tamaño final de 40,1KB y cuyo valor será utilizado para realizar las pruebas de simulación del enlace radio con el software GNU- Radio.

⁷⁷ Joaquim; Carreño,Joan;Lucaya,Javier Pardellans, “Sistemas de Archivo y Comunicación de Imagen En Radiología,” 1994, p. 67- 76, <http://www.pediatricrad.info/wo/textes/pacsteor.htm>

⁷⁸ Tatiana Noreña and Eduardo Romero, “Compresión de Imágenes Médicas,” *Biomedica* 33, no. 1 (March 1, 2013), p. 137, <https://doi.org/10.7705/biomedica.v33i1.804>

⁷⁹ gonzalez; rocio, “¡Formatos Gráficos Para Imágenes! Ventajas y Desventajas - Baética,” accessed May 16, 2020, p. 1, <https://baetica.es/formatos-graficos-imagenes/>.

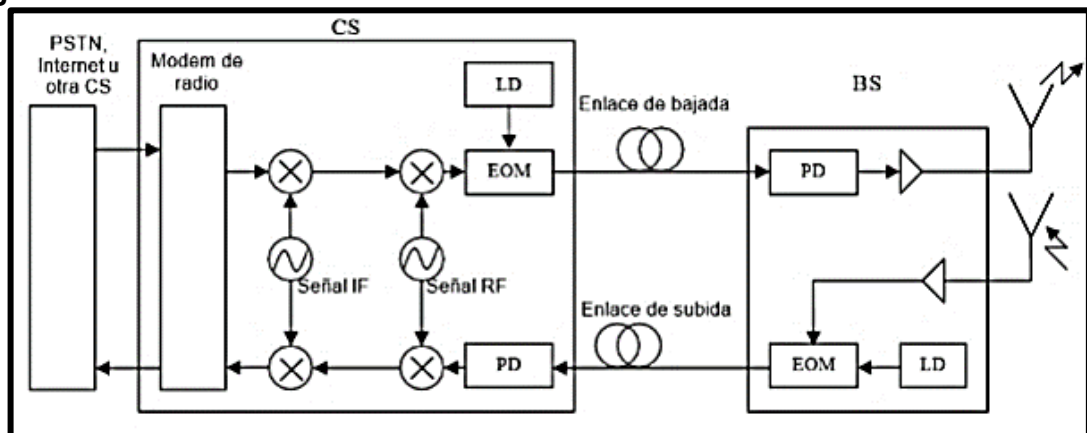
3. RADIO SOBRE FIBRA

3.1. Tipos de radio sobre fibra.

A continuación, se presenta diferentes tipos de arquitectura comúnmente usados en algunos estudios para el sistema radio sobre fibra.

3.1.1 Modulación externa en radio frecuencia Es la modulación de una señal en radio frecuencia (RF) generada en la CS con la cual se modula la portadora óptica del láser por medio del modulador óptico externo (EOM). Luego, en cada BS se recupera la señal modulada al usar un fotodetector con el cual la señal original de radio frecuencia es recuperada y posteriormente la señal es transmitida inalámbricamente con una antena y de la misma forma como la recupera la transmite directamente a los móviles a través de la antena. Esta configuración de la señal tiene la gran ventaja de tener un diseño sumamente simple de BS. Sin embargo, es susceptible a la dispersión cromática, es decir, al cambio que experimenta el índice de refracción de la fibra respecto a la longitud de onda ya que el índice disminuye a medida que aumenta la longitud de onda, lo que limita la distancia de transmisión⁸⁰, como se observa en la Figura 9.

Figura 9. Modulación externa en RF

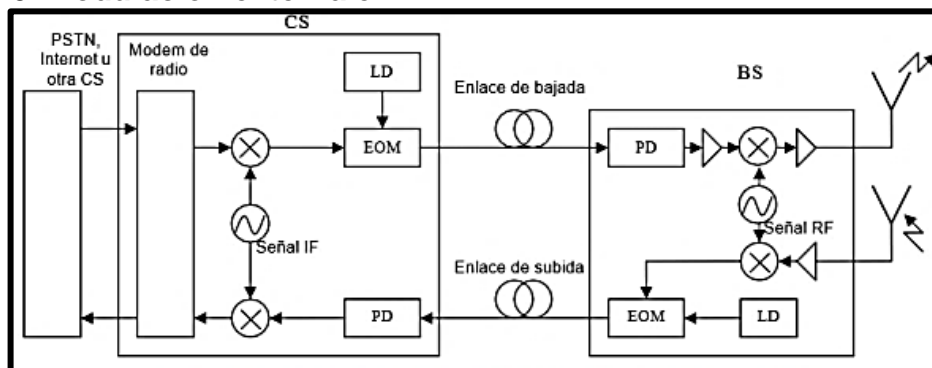


Fuente: PORTILLA, Andrés, et al. Configuración con EOM, modulando una señal en RF. [imagen]. Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios quad play al integrar un módulo RoF. 2018. 20 p. [Consultado: 3 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y97qlw8p>

⁸⁰ Magister EN TELECOMUNICACIONES Director and José Giovanni López Perafán, "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA FTTH-GPON PARA SERVICIOS QUAD PLAY AL INTEGRAR UN MÓDULO RoF ANEXOS ANDRÉS FELIPE ESCALLÓN PORTILLA. VÍCTOR HUGO RUIZ GUACHETÁ. Trabajo de Grado Para Optar Al Título De," 2018, p. 19, <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1321/Anexos.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

3.1.2 Modulación externa en frecuencia intermedia En este tipo de modulación la señal modulada es generada en la CS frecuencia intermedia (IF) y luego esta se usa para modular la portadora óptica del láser por medio del modulador OEM, así que esta configuración se llama de frecuencia intermedia sobre fibra óptica. Entonces aquí cada vez se la señal modulada se recupera de igual forma con el fotodetector y se debe convertir a RF, para poder enviar la señal a los móviles vía la antena. Lo que cambia en este esquema es que la dispersión cromática aparecida en la configuración anterior se ve disminuida, pero necesita de ciertos elementos físicos electrónicos en las estaciones base tal como un oscilador local para lograr la reconversión de IF a RF⁸¹, como se observa en la Figura 10.

Figura 10. Modulación externa en IF

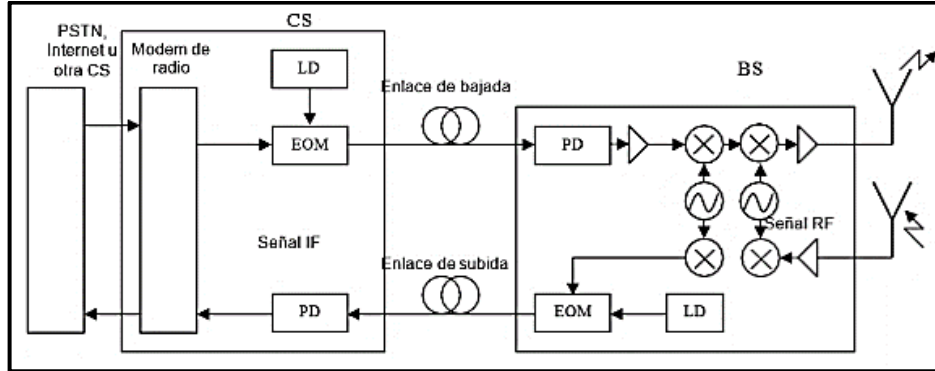


Fuente: PORTILLA, Andrés, et al. Configuración con EOM, modulando una señal en IF. [imagen]. Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios quad play al integrar un módulo RoF. 2018. 20 p. [Consultado: 3 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y97qlw8p>

3.1.3 Modulación externa en banda base. Es una modulación similar a las dos anteriores. Sin embargo, tiene de nuevo un cambio respecto a la señal modulada que arroja la CS. Esto es que es transmitida por el EOM en una frecuencia en banda base entonces en el lado de las BS la señal modulada se recupera con el fotodetector y debe ser convertida a RF ya sea directamente o pasando por IF y ya podrá ser transmitida a los móviles. En esta transmisión en banda base los efectos de la dispersión cromática ni siquiera se notan, pero la configuración en la BS es más compleja pues al no existir una subportadora de frecuencia, no hay otra alternativa que recurrir a multicanalización por división de tiempo y por división de código, como se observa en la Figura 11.

⁸¹ *Ibíd.*, p. 20.

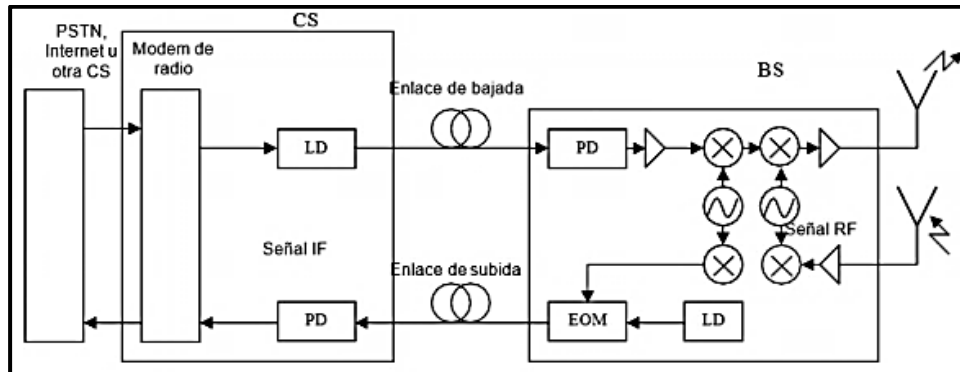
Figura 11. Modulación externa en banda base



Fuente: PORTILLA, Andrés, et al. Configuración con EOM, modulando una señal en banda base. [imagen]. Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios quad play al integrar un módulo RoF. 2018. 21 p. [Consultado: 3 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y97qlw8p>

3.1.4 Modulación directa en banda base. En este caso la señal modulada es generada por la CS en banda base o IF y es transmitida a las estaciones base realizando una modulación directa del láser. Después, en cada BS la señal modulada se recupera detectando la señal óptica modulada con el fotodetector, y el reconvertida a la banda RF y así transmitir a los móviles esto es práctico para frecuencias relativamente bajas, menores a 10 GHz⁸², como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Modulación directa en banda base



Fuente: PORTILLA, Andrés, et al. Configuración con modulación directa en banda base. [imagen]. Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios quad play al integrar un módulo RoF. 2018. 21 p. [Consultado: 3 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y97qlw8p>

En esta modulación cuando se reduce la banda de frecuencia usada para generar la señal modulada, el ancho de banda requerido para esta modulación óptica se

⁸² *Ibíd.*, p. 21.

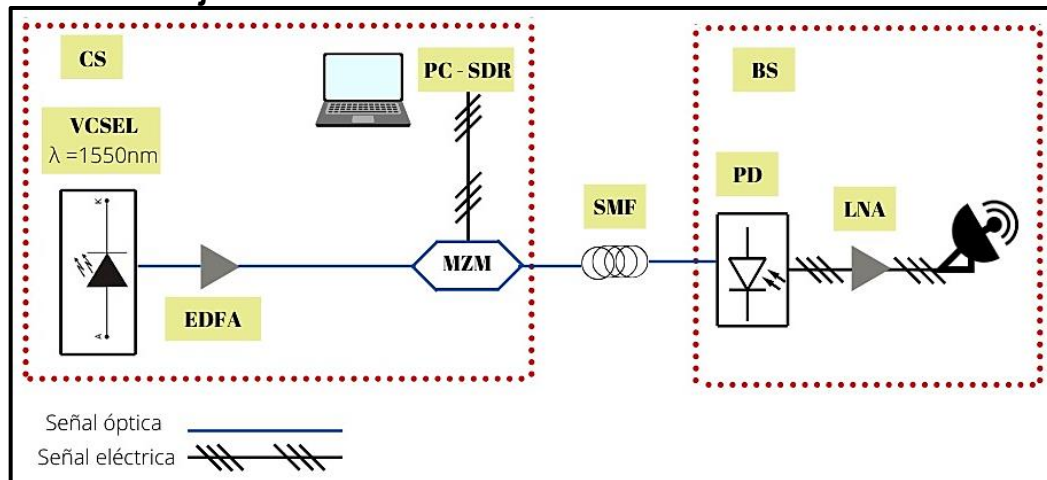
reduce en gran manera. Esto puede llegar a ser importante cuando la tecnología llega a ser combinada con multicanalización por división de longitud de onda densa (DWDM) Pero el hacer esto incrementa la cantidad de equipo en las estaciones base por la necesidad de conversión a RF. Por otro lado, al usar la transmisión con subportadora de RF, la configuración de las estaciones bases se simplifica sólo cuando se utiliza un modulador óptico externo para ondas milimétricas como convertor eléctrico-óptico y el otro lado un fotodetector de alta frecuencia como convertor óptico-eléctrico⁸³.

Para finalizar, uno de los aspectos relevantes de la modulación óptica externa es que permite una mayor linealidad y se obtiene un mayor ancho de banda debido a que el láser no está siendo modulado directamente, sino que lo determina el modulador externo⁸⁴.

3.2. Descripción del montaje general del enlace radio sobre fibra.

El diseño utilizado en el trabajo de grado es el siguiente:

Figura 13. Montaje de radio sobre fibra



Fuente: Autor.

Donde:

BS: Estación base

CS: Estación central

EDFA: Amplificador de fibra dopado con erbio

⁸³ *Ibíd.*, p. 21.

⁸⁴ Alfonso Lerín, "Modulación Directa de Diodos Láser de Alta Velocidad Para Sistemas de Transmisión Coherente" (Barcelona), accessed June 3, 2020, p. 159, https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17332/Proyecto_Final_de_Carrera.pdf?sequence=4&isAllowed=y.

LNA: Amplificador de bajo ruido
MZM: Modulador Mach-Zehnder
PD: fotodiodo
PC- SDR: Computador portátil con radio definida por software.
SMF: Estándar fibra monomodo
VCSEL: Láser emisor de superficie de cavidad vertical

En la Figura 13, se observa la estación central que consta de un computador que presenta el software GNU radio, el computador produce la señal eléctrica que iría al modulador Mach-Zehnder. Este modulador contiene dos entradas una eléctrica y otra óptica dada por el láser tipo VCSEL que opera a 1550 nm cuya señal es amplificada por el amplificador de fibra dopado con erbio. Luego la señal de salida del modulador Mach-Zehnder se conecta a un carrete de fibra óptica tipo monomodo que va conectado al fotodetector y la salida de este va conectada a un amplificador de bajo ruido que a su vez va conectado a una antena. La antena transmite la señal vía radio hasta el equipo terminal del usuario final, este montaje físico será simulado mediante el software descrito más adelante.

3.3. Software

A continuación, se encontrarán dos cuadros que comparan los programas que sobresalen para simular el enlace radio y el enlace radio sobre fibra con el objetivo de seleccionar el software que más ventajas tiene frente a los demás, para ello se va a empezar con la comparación del software del enlace radio (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de software para simular el enlace radio

Software	GNU-Radio	SoapySDR	LuaRadio
Propiedades			
Sistema operativo	GNU/Linux, Windows, Mac	Linux, Windows, Mac	Mac, Linux
Lenguaje	C++ / Python	C/C++/Python	Lua
Interfaz	GNU Radio Companion	Interfaz API	Interfaz API
Funciones generales de los bloques	Transformada rápida de Fourier fft, análisis de señal, procesamiento de la señal radio definida por software, espectrograma, espectador de espectrograma, espectro analizador, visor de espectro, síntesis, Sdr.	Sdr, procesamiento de señal, radio definida por software.	Soporte para FM, Radio ligero, señal sdr, mezclador de señal, procesamiento de señal, radio definida por software.
Licencia libre	Si	Si	Si
Características	GNU radio funciona sin necesidad de disponer de hardware de RF externo tipo USRP	se puede acceder a cualquier SDR compatible a través de la red, mediante SoapyRemote.	Es muy ligero y no requiere dependencias a menos que necesite bibliotecas altamente optimizadas en tiempo real).

Fuente: Autor⁸⁵

Del cuadro anterior se observa que el software LuaRadio a pesar de ser muy ligero, su lenguaje de programación es Lua por lo que no es un lenguaje que sea compatible si se desea transferir un bloque con otros programas, por esta razón se descarta, en el caso del software GNU-Radio y SoapySDR son muy parecidos, es decir los dos tienen licencia libre y son compatibles entre ellos. Sin embargo, se seleccionó el software GNU-Radio porque dentro de sus bloques presentan un mayor número de funciones que en el caso de SoapySDR.

⁸⁵ Alternativeto, "AlternativeTo - Crowdsourced Software Recommendations," accessed May 18, 2020, p. 1, <https://alternativeto.net/>.

Por otra parte, para el caso del software del enlace radio sobre fibra se compararon el software OptiSystem con el software VPIphotonics (ver Cuadro 2).

En este caso a pesar de que ambos programas presentaban características similares se seleccionó el software OptiSystem básicamente porque cuenta con una versión de prueba lo que para efectos prácticos facilita la simulación del enlace radio sobre fibra caso contrario al software VPIphotonics.

Cuadro 2. Comparación de software para simular el enlace radio sobre fibra.

OptiSystem	VPIphotonics
OptiSystem es un potente software de diseño innovador, que evoluciona rápidamente permitiendo a los usuarios planificar y simular casi todo tipo de enlace óptico en línea de transmisión de un amplio espectro de redes ópticas como: LAN, SAN, MAN a muy largo recorrido	VPIphotonics es un potente software con innovadora interfaz gráfica, permitiendo a los usuarios una simulación sofisticada y robusta con modelos de simulación realistas junto con representaciones flexibles de señales ópticas en diferentes grados.
Los usuarios pueden incorporar nuevos componentes basados en subsistemas y bibliotecas definidas por el usuario, o utilizar la co-simulación con una herramienta de terceros como MATLAB o SPICE	Los usuarios pueden incorporar nuevos componentes modelado con código de terceros o interno. Como MATLAB, Python, C ++ entre otros.
El lenguaje estándar de VB Script. Permite ingresar expresiones aritméticas para parámetros y crear parámetros globales que pueden compartirse entre componentes y subsistemas. También puede manipular y controlar OptiSystem, incluidos los cálculos, la creación de diseños y el procesamiento posterior.	La elección de Python como el lenguaje central de secuencias de comandos le proporciona no solo un entorno de programación orientado a objetos muy fácil de estudiar, sino también un acceso inmediato al ecosistema SciPy basado en Python de software de código abierto para matemáticas, ciencias, e ingeniería.
Licencia de red perpetua de OptiSystem	Licencia Flexible, permite a los usuarios elegir la duración de sus licencias según sus necesidades
Con versión de prueba	Sin versión de prueba.

Fuente: Autor

A continuación, se realiza una descripción del software GNU-Radio y OptiSystem que fueron seleccionados anteriormente y de los cuales permitirán la simulación del enlace radio y el enlace radio sobre fibra.

3.3.1. GNU-Radio. Es un software que presenta un conjunto de programas y bibliotecas con el objetivo de diseñar sistemas de radio, esquemas de modulación, simular las formas de señales recibidas y enviadas por medio de la configuración de sus bloques.

El trabajo de grado está licenciado bajo la licencia GPLv3. El código para la mayoría de los componentes de GNU Radio está escrito en Python, las partes críticas para el rendimiento y la latencia están escritas en C ++, lo que permite que el paquete se use para resolver problemas en tiempo real.

En combinación con transceptores programables universales que no están vinculados a la banda de frecuencia y al tipo de modulación de señal, la plataforma se puede utilizar para crear dispositivos como estaciones base para redes GSM, dispositivos para lectura remota de etiquetas RFID (identificaciones y pases electrónicos, tarjetas inteligentes). Receptores GPS, WiFi, receptores y transmisores de radio FM, decodificadores de TV, radares pasivos, analizadores de espectro, etc.⁸⁶

3.3.2. OptiSystem. Es un paquete de simulación de sistema de comunicación óptica para el diseño, prueba y optimización de prácticamente cualquier tipo de enlace óptico en la capa física de un amplio espectro de redes ópticas, desde sistemas de transmisión de video analógico hasta redes troncales intercontinentales. Un simulador de nivel de sistema basado en el modelado realista de sistemas de comunicación de fibra óptica, OptiSystem posee un poderoso entorno de simulación y sus capacidades se pueden ampliar fácilmente con la adición de componentes de usuario e interfaces integradas a una gama de herramientas ampliamente utilizadas⁸⁷.

Por otra parte, OptiSystem sirve en una amplia gama de aplicaciones, desde el diseño de red CATV / WDM y el diseño de anillo SONET / SDH hasta el diseño de mapas y el diseño de transmisores, canales, amplificadores y receptores. Además, OptiSystem tiene componentes que pueden modelar canales ópticos de espacio

⁸⁶ Naranjo David, "Llega La Nueva Versión de GNU Radio 3.8.0, La Plataforma de Procesamiento de Señales Digitales," accessed April 3, 2020, p. 1, <https://ubunlog.com/llega-la-nueva-version-de-gnu-radio-3-8-0-la-plataforma-de-procesamiento-de-senales-digitales/>.

⁸⁷ MathWorks, "OptiSystem - Software de Diseño de Sistemas de Comunicación Óptica - Productos y Servicios de Terceros - MATLAB y Simulink," accessed April 20, 2020, p. 1, https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/optisystem.html.

libre (FSO) y de radio sobre fibra (RoF), incluyendo como herramienta de visualización analizadores de prueba BER, analizadores de diagramas de ojo, analizadores de espectro, osciloscopios, visores ópticos de dominio del tiempo, medidores de potencia, analizadores de polarización, visualizadores espaciales, flujo cerrado, analizador DMD, analizador fotónico de todos los parámetros, analizador de filtro y extractor de parámetros S⁸⁸.

⁸⁸ optiwave, "OptiSystem Overview," accessed April 20, 2020, p. 1, <https://optiwave.com/optisystem-overview/>.

4. SIMULACIÓN

A continuación, se encontrará la simulación del software GNU-radio, junto con la descripción de cada uno de los bloques que se utilizaron en el esquema del enlace y más adelante se podrá identificar cada uno de los componentes utilizados para la simulación del enlace radio sobre fibra con el software OptiSystem.

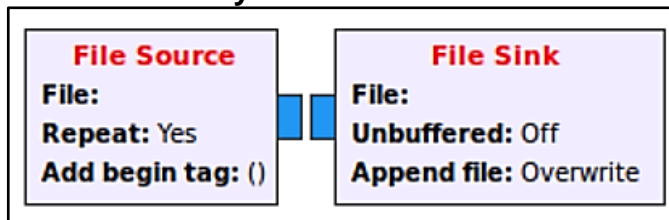
4.1 SIMULACIÓN SOFTWARE GNU-RADIO

El siguiente apartado aborda toda la información relacionada con el software GNU-Radio empezando por la descripción de cada uno de sus componentes y la explicación del montaje. Cabe aclarar que el propósito de esta simulación es generar, modular y recibir la señal eléctrica del enlace radio antes de que esta llegue al modulador Mach-Zehnder presente en el montaje general (Figura 13) descrito en el capítulo anterior.

A continuación, la descripción de cada uno de los bloques que se utilizaron para la simulación del Software GNU-radio:

4.1.1 File source y sink. Estos bloques se encargan de leer los datos de un archivo para su transmisión y almacenar los datos recibidos, por lo general para file source se utilizan los campos: file, repeat y add begin tag. En cambio, para file sink se usan los campos: file, unbuffered y append file (ver Figura 14).

Figura 14. Bloques File Source y File Sink biblioteca de GNU-radio

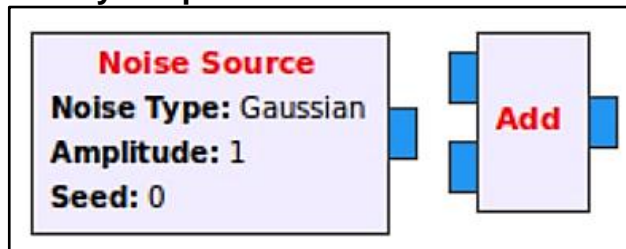


Fuente: Autor

Con respecto a lo mencionado anteriormente, en el bloque file source el campo file, se encarga de buscar el archivo que debe estar previamente guardado en el computador, repeat permite nuevamente transmitir la señal desde el inicio y con add begin tag se puede agregar una etiqueta a la primera muestra de la secuencia. Así mismo, para el bloque file sink el campo file permite guardar el archivo transmitido, unbuffered indica si la salida está o no almacenada en la memoria intermedia y con append file se puede sobrescribir los datos al archivo, o crear un nuevo archivo cada vez.

4.1.2 Noise source y bloque Add. El bloque noise source se encarga de construir una fuente de ruido, genera números aleatorios a partir de diferentes distribuciones. Actualmente solo ruido Gaussiano y uniforme están habilitados, cabe resaltar que cuando se utiliza el ruido Gaussiano su amplitud debe ser un número negativo. Por otra parte, el bloque add indica la suma de dos señales (ver Figura 15).

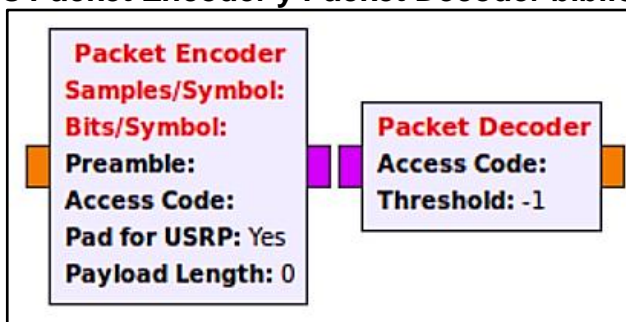
Figura 15 Noise source y bloque Add biblioteca de GNU-radio



Fuente: Autor

4.1.3 Packet encoder y decoder. En términos generales el bloque packet encoder realiza un encapsulamiento de los datos, de manera que usando el bloque packet decoder en el receptor se pueda interpretar correctamente la información que éste recibe. El bloque packet encoder recibe los datos y los envuelve en un paquete de una determinada longitud de datos útiles (payload length) junto con un encabezado, código de acceso (access code) y un preámbulo (preamble). El packet decoder revisa el código de acceso teniendo en cuenta un umbral de bit erróneos (threshold), por defecto este umbral es de -1 de modo que cuando el código de acceso es encontrado, se lee el encabezado para obtener la longitud de los datos útiles, los extrae y por último los pasa al siguiente bloque^{89,90} (ver Figura 16).

Figura 16. Bloques Packet Encoder y Packet Decoder biblioteca de GNU-radio



Fuente: Autor

⁸⁹ Tom Rondeau, "Re: [Discuss-Gnuradio] What Do Packet Encoder and Packet Decoder Do?," July 30, 2014, p. 1, <https://lists.gnu.org/archive/html/discuss-gnuradio/2014-07/msg00535.html>

⁹⁰ Leonardo Rafael Prieto, Ronald Alexander; Rojas, "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CQAM SOBRE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE," May 18, 2017, p. 50-67, <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5834>.

Por otra parte, es importante resaltar que en el bloque packet encoder es necesario colocar el número de Samples/Symbol y Bits/Symbol que debe corresponder al tipo de modulación que se va a implementar (ver Tabla 5). Además, es recomendable utilizar un módulo codificador de paquetes (packet encoder), luego de un modulador y un decodificador de paquetes (packet decoder), después de un demodulador para recibir la señal deseada.

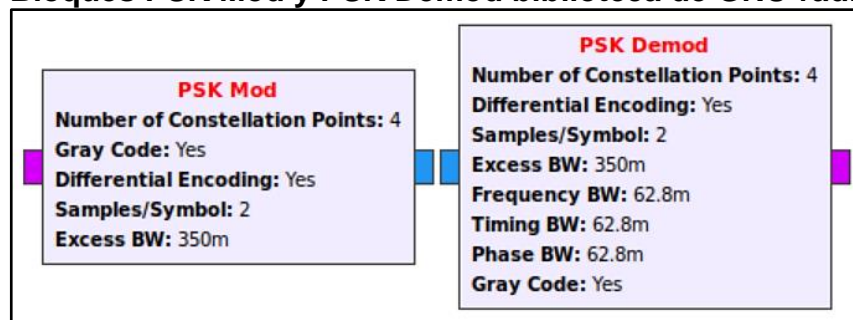
Tabla 5. Modulación Bits/Symbol

Tipo de modulación	Bits/Symbol	No. de constelaciones
Gmsk	1	$2^1 = 2$
Bpsk	1	$2^1 = 2$
8psk	3	$2^3 = 8$
Psk	2	$2^2 = 4$
Qam-8	3	$2^3 = 8$
Qam-16	4	$2^4 = 16$
Qam-64	6	$2^6 = 64$
Qam-256	8	$2^8 = 256$

Fuente: GNURADIO. GNU Radio Manual and C++ API Reference: Usage Manual. [en línea]. S.f. [Consultado: 6 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y9znmvru>

4.1.4 Bloque psk mod y psk dem. Estos bloques se encargan de procesar la señal y realizar la modulación y demodulación de la señal por desplazamiento de fase. Para el bloque psk mod por defecto se disponen de los siguientes campos: number of constellations points que se define por el número de Bits/Symbol, gray code que se utiliza para la asignación de bits a cada símbolo, differential encoding para utilizar la codificación diferencial booleana, Samples/Symbol es el número de muestras por baudio y excess bw es el ancho de banda del filtro raíz de coseno alzado (ver Figura 17).

Figura 17. Bloques PSK Mod y PSK Demod biblioteca de GNU-radio

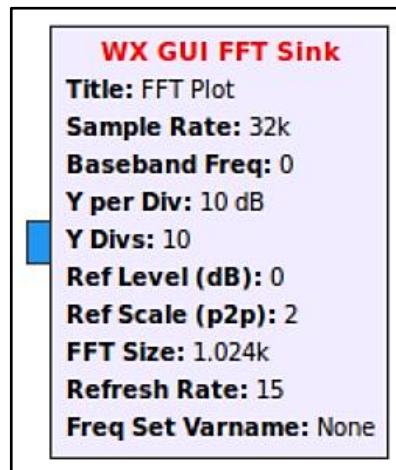


Fuente: Autor

Es importante mencionar que para efectos de la simulación se eligió una modulación Psk debido a que la organización de estandarización ha decidido para la nueva generación 5g utilizar como esquema de acceso la multiplexación por división ortogonal en frecuencia OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing)⁹¹. Dicha modulación consiste en enviar la información modulando en Qam o en Psk un conjunto de portadoras de diferente frecuencia.

4.1.5 Wx gui fft sink. Este bloque permite visualizar la señal, realizando las funciones de un analizador de espectros, es decir cumple la función de mostrar gráficamente la respuesta en frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT). Como se puede ver en la Figura 18 este bloque presenta varios campos como la frecuencia de muestreo (Sample rate), tamaño FFT (FFT size) que es la cantidad de puntos que utiliza la transformada de Fourier para graficar la señal, varía entre 1024K y 2048K, los demás campos permiten ajustar la escala de visualización.

Figura 18. Bloque WX GUI FFT Sink biblioteca de GNU-radio



Fuente: Autor

En este bloque cabe aclarar que la frecuencia banda base que se simuló fue de 3.5GHz la cual según el ultimo informe de la ANE, es la primera frecuencia que se va a utilizar en Colombia para redes 5G. Sin embargo, no sería la única, pues también se contemplan otras frecuencias como 28GHz y 32GHz. Así mismo, es necesario resaltar, que esta banda es la más subastada en el mundo ya que brinda un equilibrio entre capacidad y cobertura⁹².

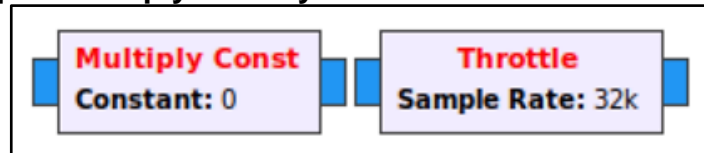
⁹¹ Schwarz Rohde, "Formas de Onda 5G ," accessed May 7, 2020, p. 1, https://www.rohde-schwarz.com/es/soluciones/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/formas-de-onda-5g/formas-de-onda-5g_230224.html?rusprivacypolicy=0.

⁹² Sylvia Constaín et al., "Plan 5G Colombia El Futuro Digital Es de Todos," accessed May 18, 2020, p. 37-38, https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-118058_plan_5g_2019120.pdf

Con respecto a lo mencionado anteriormente, se elige la frecuencia de 3,5 GHz, con el propósito de que el enlace radio sobre fibra que se está simulado pueda funcionar en la quinta generación ya que proporciona una mayor velocidad, conectividad de dispositivos y menor latencia⁹³.

4.1.6. Bloque multiply const y throttle. El bloque multiply const como su nombre lo indica, se encarga de multiplicar el valor de una constante y el bloque throttle de la biblioteca GNU se usa para mantener una velocidad de datos constante en tiempo real. Así mismo, limita la transferencia de datos a la velocidad de muestreo especificado. Esto evita a GNU Radio consumir todos los recursos de la CPU cuando los bloques no están siendo regulados por hardware externo (USRP o Dispositivo SDR)⁹⁴ (ver Figura 19).

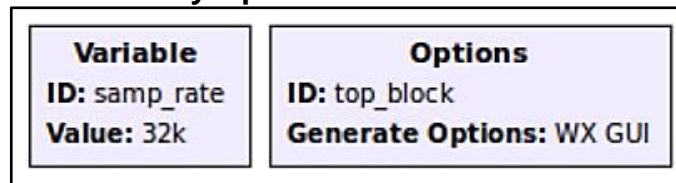
Figura 19. Bloques Multiply Const y Throttle biblioteca de GNU-radio



Fuente: Autor

4.1.7 Variable. El bloque variable se encarga de ajustar la frecuencia de muestreo para que sea el mismo valor para todos los bloques por medio del campo value, con ID el valor a introducir en este espacio es de libre elección del usuario, resaltando que puede hacer referencia a esta variable en otro bloque mediante su ID. Por otra parte, en el bloque de options se compone de dos campos: el primero es ID el cual responde al nombre de la variable Python que se genera y el segundo es generate options el cual permite elegir entre WX GUI, Qt GUI, entre otros y se debe seleccionar según los componentes que se van a utilizar para una determinada aplicación (ver Figura 20).

Figura 20. Bloques Variable y Options biblioteca de GNU-radio



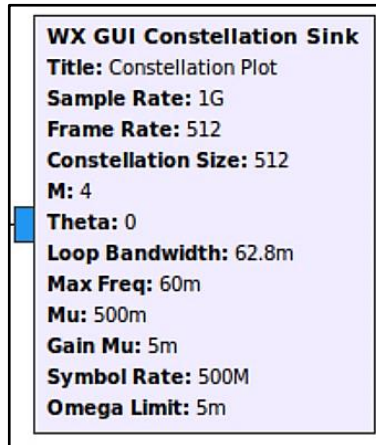
Fuente: Autor

⁹³ Linda Patiño, "¿Qué Significa Que Colombia Tenga Su Primera Red 5G? - Novedades Tecnología - Tecnología - ELTIEMPO.COM," May 11, 2020, p. 1, <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/que-significa-que-colombia-tenga-su-primera-red-5g-494254>

⁹⁴ Prieto, Rojas, "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CQAM SOBRE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE", Op. cit., p. 48.

4.1.8 Wx gui constellations sink. Es el bloque encargado de visualizar el diagrama de contelaciones para el formato WX GUI, en este bloque M representa el número de constelaciones que se estan simulando y los demas campos permiten configurar el tamaño y puntos de la grafica (ver Figura 21).

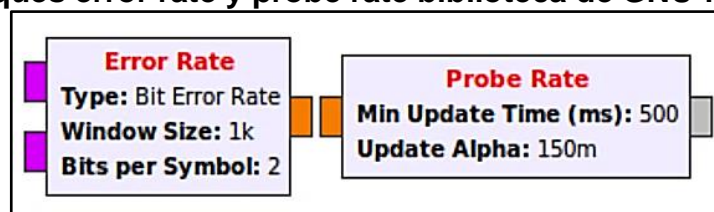
Figura 21. Bloque WX GUI Constellations Sink biblioteca de GNU-radio



Fuente: Autor

4.1.9 Error rate y probe rate. El bloque error rate compara la secuencia de bytes de entrada con la secuencia de bytes de referencia, presenta 3 campos el primero especifica el tipo de error rate, el segundo configura el tamaño de la ventana y por ultimo se establece cuantos bytes que entran se representan con un simbolo. Por otra parte, el bloque probe rate es el encargado de medir cuantas muestras fluyen por segundo, cuenta con dos campo en los cuales se configura el tamaño de cada elemento de transmisión y su tiempo minimo de actualización en este caso fue de 500ms como se observa en la Figura 22.

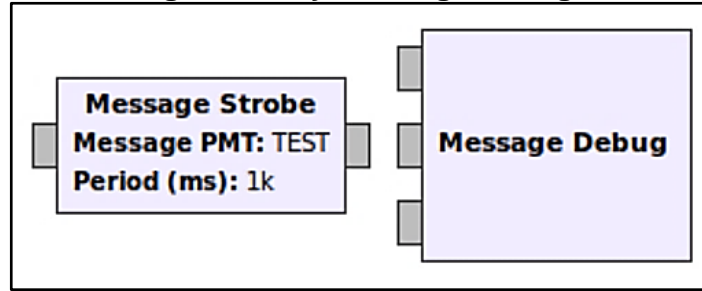
Figura 22. Bloques error rate y probe rate biblioteca de GNU-Radio



Fuente: Autor

4.1.10 Message strobe y message debug. En el caso del bloque message strobe se encarga de probar el sistema de mensajes cada milisegundo y para el bloque message debug su función es almacenar e imprimir el mensaje a medida que se reciben los datos como se observa en la Figura 23.

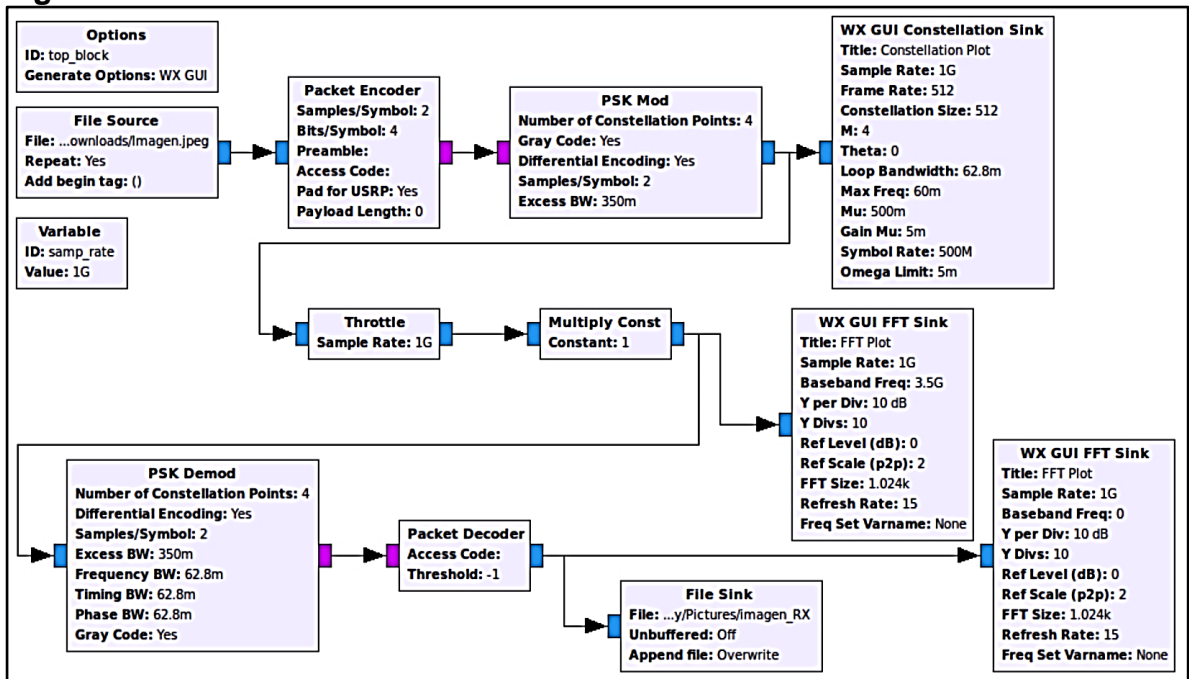
Figura 23. Bloques message strobe y message debug biblioteca de GNU-Radio



Fuente: Autor

Configurando los bloques anteriormente mencionados se obtienen los siguiente esquemas:

Figura 24. Simulación enlace radio con GNU-radio



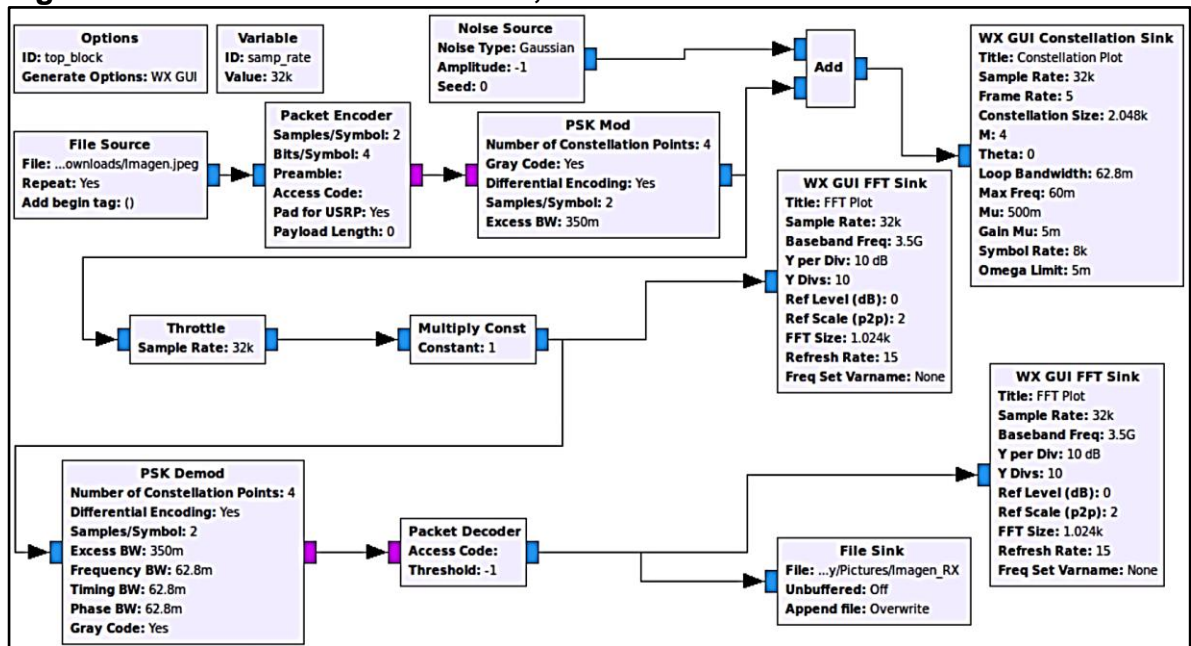
Fuente: Autor

En la Figura 24, se encuentra una comunicación unidireccional, conformada por una parte de transmisión y una parte de recepción. La parte de transmisión consiste en seleccionar un archivo en este caso una imagen radiográfica, que luego se convertirán en formato binario, luego esto datos son empaquetados por el bloque packet encoder donde se le asigna 4 Bits/Symbol y 2 Samples/Symbol, es decir se encapsulan los datos en paquetes de 4 bits. Después, estos paquetes llegan al bloque de modulación en donde se le asigna una posición en código gray a los bits ingresados de acuerdo a los símbolos presentes en la constelación, por lo que en este bloque los símbolos pasan a ser muestras complejas con una fase y

cuadratura. Luego, el bloque demodulador se encarga de convertir nuevamente las muestras complejas en una cadena de bytes. Posteriormente los datos son desempaquetados, es decir vuelven a ser una cadena de bits y se guarda la imagen radiográfica que se ha enviado mediante el bloque file Sink. Por último, con el bloque WX GUI FFT Sink se visualiza el espectro de la señal tanto enviada como recibida y con el bloque WX GUI Constellations Sink se visualiza el número de costelaciones que por ser PSK el número es 4 tal y como se indica en la Tabla 5.

Por otra parte, es necesario mencionar que el esquema del enlace radio propuesto en la Figura 24 es en un escenario ideal (libre de ruido). Sin embargo, para efectos de la simulación se realizó un esquema contemplando un escenario real en donde pueden existir diferentes tipos de pérdidas a causa de ruidos como el laplaciano, gaussiano, impulsivo, entre otros (ver Figura 25).

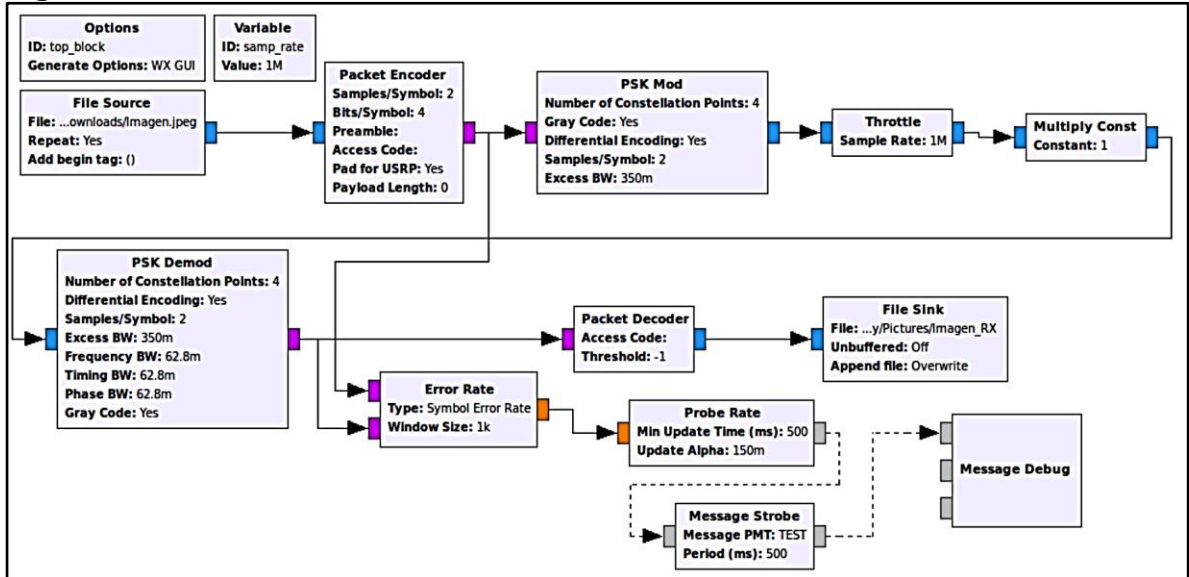
Figura 25. Simulación enlace radio, escenario con ruido en GNU-radio.



Fuente: Autor

Cabe resaltar que la tasa de error de bits es un indicador de cómo es la calidad del enlace radio e identificar si existe una correcta transmisión de datos, es por esta razón que se utilizaron los bloques error rate, probe rate, message strobe y message debug los cuales permiten visualizar cuantos datos se modulan por símbolo en este caso se tomó como cadena de bits de entrada los datos de la salida del demodulador PSK y como referencia la entrada de bits que llegan al bloque de modulación PSK como se observa en la Figura 26, los cuales son guardados en el bloque message debug para luego ser mostrados en la consola del programa.

Figura 26. Simulación error rate enlace radio en GNU-radio.



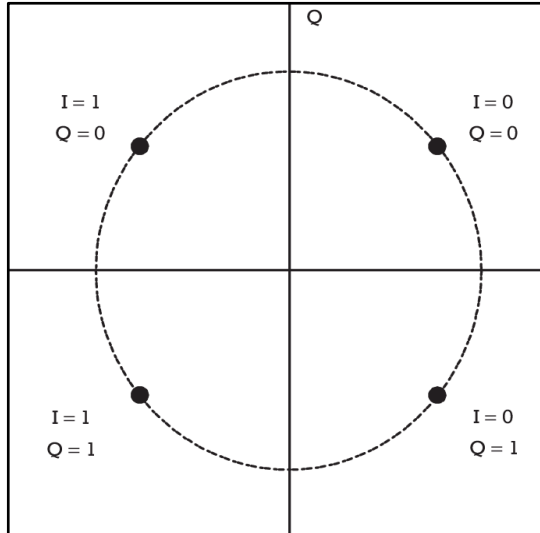
Fuente: Autor

4.1.9 Modulación psk: Para la simulación de enlace radio se utiliza la simulación PSK que consiste en variar la fase sin embargo permanece constante su amplitud y frecuencia, de esta forma la señal de la portadora toma dos valores de fase. Donde, la asignación de bits a cada símbolo suele implementarse mediante código Gray, el cual consiste en la variación de un único bit entre símbolos adyacentes, minimizando de esta forma la tasa de bits erróneos (BER)⁹⁵. Así mismo, los estados de modulación PSK se representan mediante puntos en un diagrama vectorial. Cada punto identifica un estado de modulación, caracterizado por una fase y una amplitud. Esta representación se denomina diagrama de constelación o simplemente constelación⁹⁶ (ver Figura 27).

⁹⁵ David Sacie Alcázar, “Simulación de Sistemas CO-OFDM 4D Ópticos,” accessed June 30, 2020, p. 21, <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40579/6/dsacieaITFM0115memoria.pdf>.

⁹⁶ *Ibíd.*, p. 21-23.

Figura 27 Diagrama de constelaciones modulación PSK



Fuente: SMITS, Jan. Diagrama de constelaciones. [imagen]. Difusión de video digital: tecnología, estándares y regulaciones. Boston. 2018. 180 p. [Consultado: 8 de enero de 2020]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yao2x9ro>

Para concluir esta sección de la simulación del enlace radio del software GNU-Radio es importante resaltar que se eligió una modulación PSK debido a que la organización internacional de normalización ha decidido para la nueva generación 5G utilizar como esquema de acceso la multiplexación por división ortogonal en frecuencia OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing)⁹⁷.

Cabe resaltar que una de las ventajas que tiene PSK frente a QAM es que permite disminuir el error pues llega la información tanto a los bits que presenta o no presentan prioridad. Además, con PSK la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que el diseño de amplificadores y etapas se simplifica⁹⁸. En cambio, con QAM la transmisión de datos ofrece alta eficiencia de transmisión mediante la utilización de variaciones de amplitud y de fase. Sin embargo, ofrece protección equitativa de bits de alta y baja prioridad generando una gran posibilidad de error por parte del receptor al aumento de información debido a las interferencias en el canal de comunicación⁹⁹.

⁹⁷ Rohde, "Formas de Onda 5G", Op. cit., p. 1.

⁹⁸ Tilleria Cabrera Mercedes Alicia, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES APLICADAS A LA MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN DIGITAL A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA MATLAB/SIMULINK" (quito, November 2016), p. 39, <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16886/1/CD-7465.pdf>

⁹⁹ Prieto, Ronald Alexander; Rojas, "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CQAM SOBRE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE", Op. cit., p. 18.

4.2 SIMULACIÓN SOFTWARE OPTISYSTEM

Luego de la simulación de generación y recepción de las señales de radio que se realizó con GNU-radio, con el Software OptiSystem se realiza la simulación del enlace óptico, es así como en esta sección se encontrará la descripción de los componentes, junto con su respectivo esquema del enlace radio sobre fibra.

Con respecto a lo mencionado anteriormente para la simulación en OptiSystem los siguientes elementos se seleccionaron de acuerdo a los requerimientos de la elaboración del prototipo y que sin su implementación no hubiera sido posible realizar el enlace radio sobre fibra, estos elementos fueron:

4.2.1 Pseudo-random bit sequence generator. Este componente para efectos de la simulación fue el encargado de generar una secuencia aleatoria de unos y ceros, permitiendo simular la entrada de datos como si fueran los bits que están llegando de la radiografía de toráx.

4.2.2 NRZ pulse generator. Este bloque permite una señal eléctrica codificada sin retorno a cero que depende de una entrada de secuencia de bits¹⁰⁰. En esta parte la señal es utilizada para modular una portadora, por esta razón la señal es codificada mediante ceros o unos.

4.2.3 MZM modulator analytical. Es un modulador de intensidad es decir que al llegar la señal óptica se divide en 2 ramas formando una “Y”, donde una de sus ramas propaga la señal óptica y la otra rama la modula. Por otra parte, una de las ventajas de utilizar este modulador es que se puede trabajar con un nivel constante de alimentación en la fuente óptica y conseguir mayores velocidades de modulación.

4.2.4. Fotodetector. Como su nombre lo indica es el encargado de detectar la señal óptica proveniente del carrete de fibra óptica y convertirla en una corriente eléctrica en función de la capacidad de respuesta del dispositivo.

Por otra parte, en cuanto a los componentes mencionados a continuación, el software OptiSystem contaba con varias opciones. Sin embargo, fueron seleccionados de acuerdo a los parámetros del enlace radio sobre fibra y a su funcionamiento con los demás elementos, estos componentes fueron:

4.2.5 Optical fiber. Como se mencionó anteriormente el software OptiSystem presenta varios tipos de fibra entre ellas optical fiber CWDM y bidirectional optical fiber. Sin embargo, para efectos de la simulación se eligió una fibra monomodo que presenta mayor alcance y menor atenuación que una fibra multimodo. Resaltando

¹⁰⁰ Optiwave, “How To Set Up An NRZ Pulse Generator In OptiSystem,” accessed May 18, 2020, p. 1, <https://optiwave.com/products/system-and-amplifier-design/optisystem/optisystem-videos/optisystem-training-videos/how-to-set-up-an-nrz-pulse-generator-in-optisystem/>.

que solo se va a transmitir una señal, en un solo sentido y con una ventana de 1550nm debido a que se tiene menos pérdidas por dispersión de fotones (Scattering). Por otra parte, se utilizó un alcance de 10Km debido a que es un valor estándar que no supera la distancia máxima para un enlace de fibra óptica monomodo la cual es de 20Km¹⁰¹.

4.2.6 Cw laser. En cuanto a la señal óptica el software ofrece varias opciones entre ellas Vcsel laser, CW laser, Fabry perot laser, DFB laser. Sin embargo, se selecciona un láser de onda continua pensando en sus ventajas de que el láser se emite luz de forma continua, es decir, que tiene una potencia de haz media estable. Además, este tipo de láser por lo general se enfoca en la potencia y el alto rendimiento, por lo que son más habituales encontrarlos en el sector médico¹⁰².

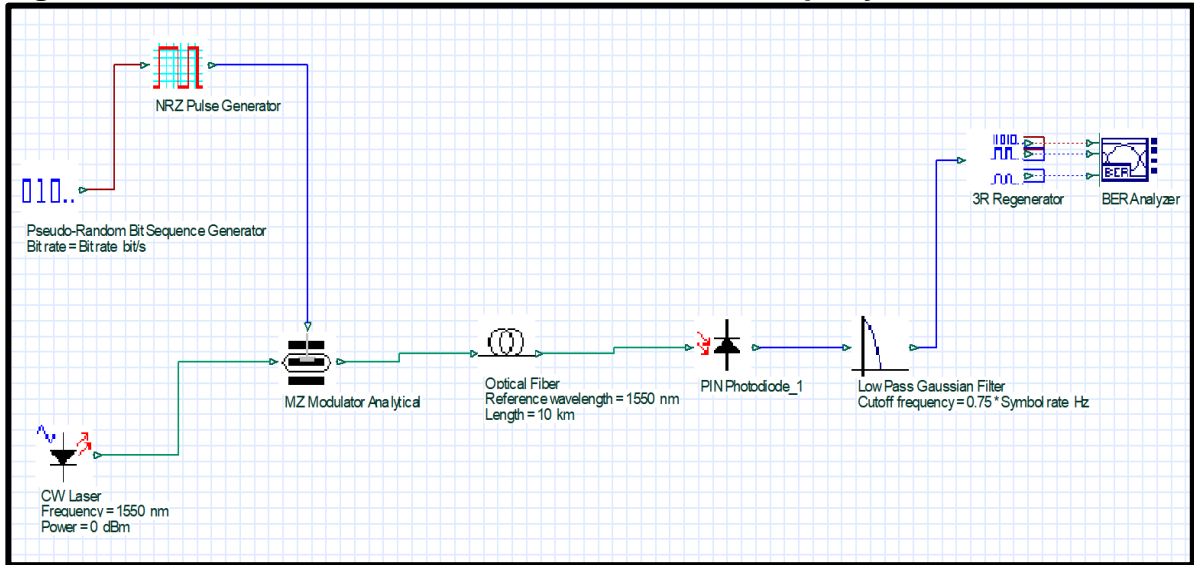
4.2.7 Low pass Gaussian filter. Al igual que los anteriores componentes el software ofrece varias opciones de filtro pasa bajo como: Butterworth, Bessel, Chebyshev entre otros, no obstante, se seleccionó el filtro gaussiano pensando en que este filtro es el más utilizado para reducir el ruido de las imágenes.

Una vez seleccionados los componentes de la librería del software OptiSystem se procede a realizar el esquema del enlace radio sobre fibra.

¹⁰¹ Geronimo; Cesar, "Libro de Comunicaciones Ópticas by Cesar Geronimo - Issuu," accessed May 18, 2020, p. 21-35, https://issuu.com/cesargeronimo2/docs/libro_de_comunicaciones_opticas

¹⁰² Del Láser, Alumno : Javier, and Esténoz Valenzuela, "ESTUDIO SOBRE LAS APLICACIONES INDUSTRIALES PROYECTO FIN DE CARRERA," March 2011, p. 18-54, <http://zaguan.unizar.es/record/5646/files/TAZ-PFC-2011-098.pdf>

Figura 28. Simulación enlace radio sobre fibra con OptiSystem.



Fuente: Autor

En la Figura 28, se observa en el bloque del transmisor la entrada de dos señales al modulador mach-zehnder, una eléctrica (línea color azul) que proporciona la trama de datos y una señal óptica (línea color verde) generada por el láser de onda continua que emite una frecuencia de longitud de onda de 1550 nm, ambas señales son moduladas en intensidad óptica. Después, la señal que se obtiene se dirige hacia un carrete de fibra óptica de 10 Km, este valor representa la mitad de la distancia máxima que es de 20 Km para un enlace de fibra óptica monomodo. Luego, esta señal es capturada por el fotodetector que convierte la señal óptica en señal eléctrica, para enviar la señal por un filtro gaussiano pasa bajo donde se elimina el ruido. Finalmente, se genera la secuencia de bits original y con el analizador BER a través del diagrama de ojo se visualiza cual es la tasa de error de bits.

4.2.8 Modulación de intensidad. En el enlace de radio sobre fibra se utiliza la modulación por intensidad óptica externa dada por el modulador Mach-Zehnder. El cual hace uso de una portadora de referencia con la que comparan la señal recibida. En el caso de las comunicaciones ópticas, la portadora de referencia, llamada comúnmente oscilador local, es una fuente láser. Dependiendo de la diferencia entre la fase del oscilador local y la fase de la señal recibida, el receptor generará un 1 lógico o un 0 lógico¹⁰³

¹⁰³ "Formatos de Modulación Para Altos Regímenes Binarios 3.1.-Introducción," accessed May 23, 2020, p. 39, <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/40055/fichero/Volumen+1%252F07+-+Capitulo+3+-+Formatos+de+modulacion+para+altos+regimenes+binarios.pdf>

5. RESULTADOS

Los resultados mostrados a continuación se obtienen de enviar una imagen radiográfica que pesa 40,1 KB y comparar el tamaño de la imagen recibida variando el data rate con el software GNU-radio y OptiSystem. Resaltando que para realizar las pruebas en GNU radio bajo el sistema operativo de Linux fue necesario que el dispositivo de hardware contará como mínimo con los siguientes requerimientos presentes en el Cuadro 3:

Cuadro 3. Características de instalación de GNU radio en Linux

Parámetro	Descripción
Procesador doble núcleo	2GHz
Memoria del sistema	2GB
Espacio libre en el disco duro	25GB

Fuente: UBUNTU. Download Ubuntu Desktop. [en línea]. S.f. [Consultado: 6 de mayo de 2020]. Disponible en: shorturl.at/jvzHM

Con respecto a las características de hardware mencionadas en el anterior cuadro, el software GNU radio fue instalado en un computador que cuenta con los siguientes parámetros como se aprecia en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Parámetros del hardware utilizado para las pruebas de simulación

Parámetro	Descripción
Referencia	Asus TUF gaming FX504 series
Procesador 4 núcleos	2.30GHz
Memoria RAM	8GB
Espacio libre en el disco duro	734GB
Tarjeta grafica	NVIDIA GeForce GTX 1060
Resolución	1920x1080
Sistema operativo	64 bits

Fuente: Autor

Cabe resaltar que para las pruebas de simulación en GNU- radio se seleccionaron los data rate más altos teniendo en cuenta el tiempo que demora el procesador descrito en el cuadro anterior para completar la transmisión de la imagen, ya que a medida que se tenga una mayor cantidad de muestras, se requiere una mayor cantidad de recursos del computador.

Con respecto a lo mencionado anteriormente para las pruebas de simulación se utilizaron tres data rate, delimitados por el software GNU-radio, los cuales fueron: 20Mbps (ver ecuación 9), 200Mbps (ver ecuación 10) y 2Gbps (ver ecuación 11).

La ecuación 9 permite conocer el data rate, de 20Mbps, para una velocidad de muestreo de 10M Samples/segundo. Este data rate resulta ser mayor al de 5Mbps que es el valor mínimo que se requiere para poder transmitir una imagen tipo radiografía en tiempo real¹⁰⁴.

$$\begin{aligned}
 & 10M \frac{\text{Samples}}{\text{segundo}} * \frac{\frac{4 \text{ bits}}{\text{Symbol}}}{\frac{2 \text{ Samples}}{\text{Symbol}}} & (9) \\
 & 10M \frac{\text{Samples}}{\text{segundo}} * \frac{2 \text{ bits}}{\text{Samples}} \\
 & 20M \frac{\text{bits}}{\text{Samples}} = 20 \text{ Mbps}
 \end{aligned}$$

La ecuación 10 corresponde a un data rate de 200Mbps, con una velocidad de muestreo de 100M Sample/segundo. Cabe resaltar, que en este momento existen equipos que utilizan este tipo de data rate e incluso mayores gracias a que utilizan en su conexión fibra óptica¹⁰⁵.

$$\begin{aligned}
 & 100M \frac{\text{Samples}}{\text{segundo}} * \frac{\frac{4 \text{ bits}}{\text{Symbol}}}{\frac{2 \text{ Samples}}{\text{Symbol}}} & (10) \\
 & 100M \frac{\text{Samples}}{\text{segundo}} * \frac{2 \text{ bits}}{\text{Samples}} \\
 & 200M \frac{\text{bits}}{\text{Samples}} = 200 \text{ Mbps}
 \end{aligned}$$

La ecuación 11 corresponde a un data rate de 2Gbps, para una velocidad de muestreo de 1G Sample/segundo. Este data rate resulta ser adecuado para realizar

¹⁰⁴ laura martinez velandia, "PROPUESTA PARA MONTAJE DE LABORATORIO DE TELESALUD Y TELEMEDICINA LAURA MARTINEZ VELANDIA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DE INGENIERIA PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA ELECTRONICA" (Bogotá, 2018), p. 23-25, <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7983/1/MartinezVelandiaLaura2018.pdf>

¹⁰⁵ Rastreator, "Conexiones Simétricas," October 28, 2014, p. 1, <https://www.rastreator.com/telefonía/articulos-destacados/conexiones-simetricas.aspx>.

una transmisión en tiempo real que se acerca a las velocidades que alcanza la tecnología 5g de hasta 10Gbps¹⁰⁶.

$$\begin{aligned}
 & 1G \frac{\text{Samples}}{\text{segundo}} * \frac{\frac{4 \text{ bits}}{\text{Symbol}}}{\frac{2 \text{ Samples}}{\text{Symbol}}} & (11) \\
 & 1G \frac{\text{Samples}}{\text{segundo}} * \frac{2 \text{ bits}}{\text{Samples}} \\
 & 2G \frac{\text{bits}}{\text{Samples}} = 2 \text{ Gbps}
 \end{aligned}$$

5.1 RESULTADOS GNU-RADIO

En esta sección se encontrarán los resultados, en cuanto a tablas de las pruebas realizadas con los tres data rate seleccionados anteriormente y su respectiva grafica de la simulación del enlace radio en GNU radio.

Para los data rate anteriormente mencionados se realizaron 10 pruebas, obteniendo diferentes tipos de tamaños, (ver Anexo B, C y D). Como en la simulación se enviaba la misma imagen varias veces fue necesario hallar el tamaño final de una sola imagen. Es decir, si el archivo enviado era de 40,1KB y el archivo recibido pesaba 3,93MB, se transmitían 98 imágenes y el tamaño final de una sola imagen era de 41,05KB, ver ecuación 12. De este modo se hallaron los valores del tamaño de la imagen RX en las tablas 6, 7 y 8.

$$\begin{aligned}
 \text{Imágenes enviadas} &= \frac{\text{Tamaño archivo recibido}}{\text{Tamaño archivo enviado}} & (12) \\
 &= \frac{3,93 \times 10^6}{40,1 \times 10^3} = 98 \text{ imágenes}
 \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned}
 \text{tamaño imagen} &= \frac{\text{Tamaño archivo recibido}}{\text{Imágenes enviadas}} \\
 &= \frac{3,9 \times 10^6}{98} = 41,05 \text{ KB}
 \end{aligned}$$

¹⁰⁶ Xiang Liu, "Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era," 2010, p. 1, https://www.researchgate.net/publication/337353783_Evolution_of_Fiber-Optic_Transmission_and_Networking_Towards_the_5G_Era.

En la Tabla 6, se observa que el tamaño de las imágenes recibidas varía entre un rango de 40091 Bytes a 40093 Bytes. De la misma forma, las imágenes que se transmitieron en promedio presentan un tamaño de 40093,151 Bytes. Por lo que al comparar esta información con el archivo enviado existe una pérdida de datos en promedio de 1.151 Bytes cuando se transmite la imagen a un data rate de 20Mbps.

Tabla 6. Datos de medición en GNU-radio con data rate de 20Mbps

No. de pruebas	Archivo enviado Tx (Bytes)	Archivo recibido Rx (Bytes)	Tamaño imagen Rx (Bytes)
1	40092	932185	40093,978
2	40092	942080	40088,510
3	40092	974848	40084,421
4	40092	966656	40093,571
5	40092	966656	40093,571
6	40092	913408	40096,927
7	40092	987136	40094,882
8	40092	983040	40091,354
9	40092	970752	40097,149
10	40092	970752	40097,149
Promedio de imágenes	40092	960751,3	40093,151

Fuente: Autor

En la Tabla 7, se observa que el tamaño de imagen varía tomando como valor máximo 40092,152 Bytes y valor mínimo 40091,570 Bytes. Sin embargo, se tiene un tamaño promedio de 40091,970 Bytes, al comparar este dato con el tamaño de la imagen enviada se puede decir que la cantidad de bytes que llegaron se acerca al valor real de la imagen que se está transmitiendo. No obstante, existe una diferencia de 0,030 bytes cuando se envía la imagen con un data rate de 200Mbps

Tabla 7. Datos de medición en GNU-radio con data rate de 200Mbps

No. de pruebas	Archivo enviado Tx (Bytes)	Archivo recibido Rx (Bytes)	Tamaño imagen Rx (Bytes)
1	40092	14843904	40091,570
2	40092	14819328	40092,330
3	40092	14471168	40091,890
4	40092	14942208	40091,784
5	40092	14778368	40092,152
6	40092	14860288	40092,507
7	40092	14602240	40091,813
8	40092	14647296	40092,232
9	40092	14749696	40091,590
10	40092	14905344	40091,839
Promedio de imágenes	40092	14761984	40091,970

Fuente: Autor

En la Tabla 8, se observa que los valores obtenidos en cada prueba son constantes, sin que se presente un amplio rango entre su valor mínimo de 40092,001 Bytes y máximo de 40092,120 Bytes. Es decir, se mantiene el tamaño de 4092 con variaciones en sus decimales. Por otra parte, a pesar que el tamaño promedio fue de 40092,063, no es exacto con el valor real de la radiografía transmitida, aun así, estas pérdidas no superan una diferencia de 0,063 Bytes cuando se envía la imagen con un data rate de 2Gbps.

Tabla 8. Datos de medición en GNU-radio con data rate de 2Gbps

No. de pruebas	Archivo enviado Tx (Bytes)	Archivo recibido Rx (Bytes)	Tamaño imagen Rx (Bytes)
1	40092	123068416	40092,002
2	40092	124055552	40092,025
3	40092	123269120	40092,082
4	40092	123518976	40092,108
5	40092	123068416	40092,002
6	40092	123711488	40092,001
7	40092	123138048	40092,091
8	40092	124084224	40092,092
9	40092	123691008	40092,120
10	40092	123179008	40092,113
Promedio de imágenes	40092	123478425,6	40092,063

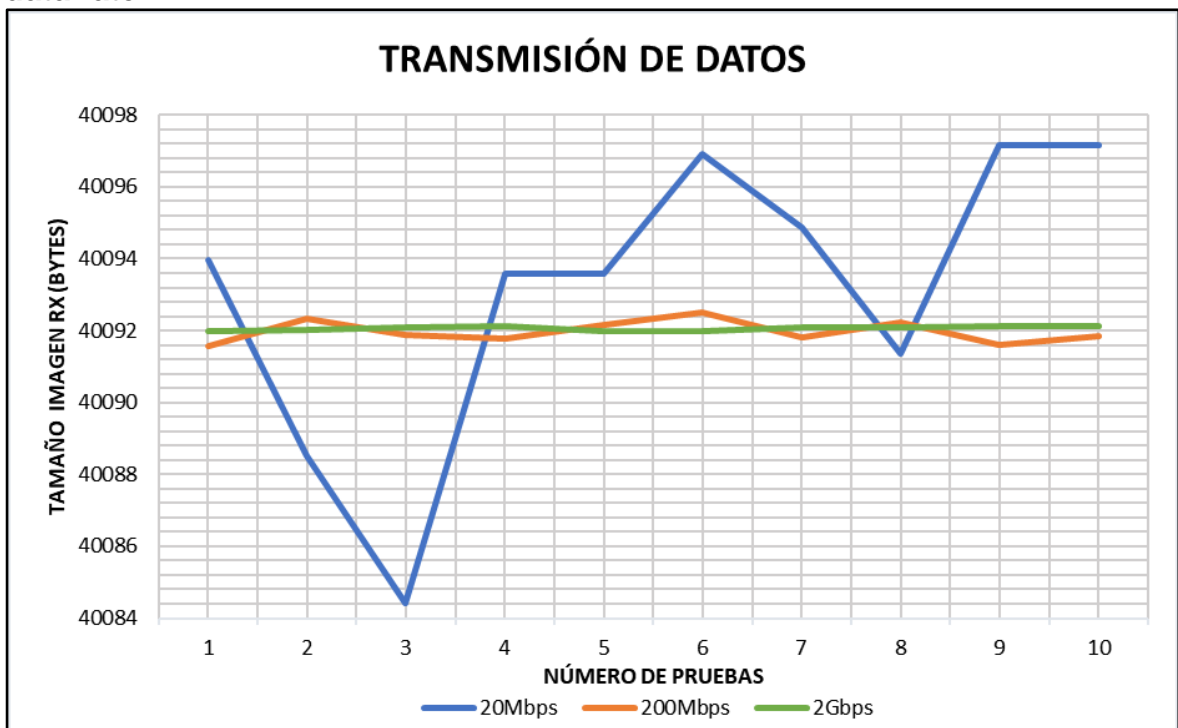
Fuente: Autor

Como se observó en las anteriores tablas el tamaño de la imagen recibida cambia con respecto al tamaño de la imagen original. Esto se debe en gran parte, a la

cantidad de bits que llegan, ya que si en el proceso de modulación y demodulación se pierde bits o llegan demás afecta directamente el tamaño de la imagen que se recibe. Cabe resaltar que estas pérdidas de bits se deben a la codificación del canal es decir al momento de convertir los símbolos para que sean compatibles en la transmisión, velocidad de muestreo, relación señal a ruido, problemas de sincronización o cuando el ancho de banda del canal resulta ser insuficiente.

De acuerdo, con los datos obtenidos en cada Tabla (6, 7 y 8) se realizó la gráfica de transmisión de datos (ver Figura 29) la cual compara el tamaño de la imagen cuando se transmite con un data rate de 20Mbps, 200Mbps y 2Gbps.

Figura 29. Visualización del tamaño de imagen radiográfica con diferentes data rate.



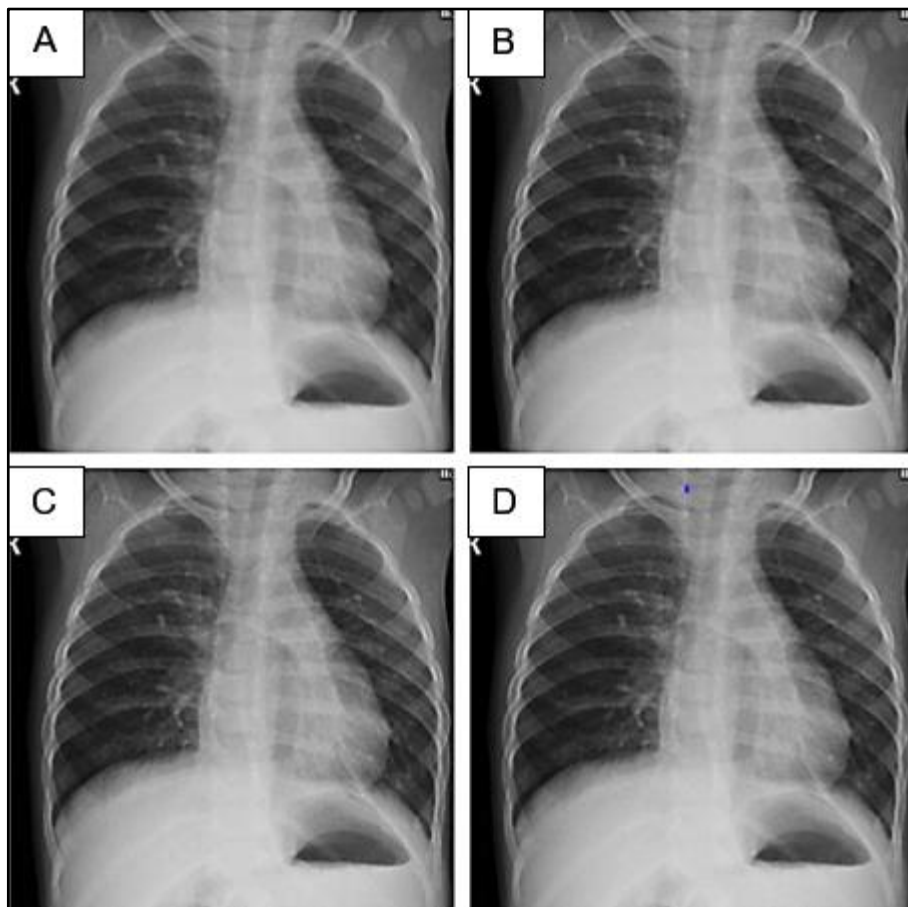
Fuente: Autor

Por otra parte, como se observa en la Figura 29, para el data rate de 20Mbps los valores que se registraron no fueron constantes. Donde, por cada 10 pruebas que se realizaron, solo 4 de ellas se acercaban dentro de un rango de 40090,5 Bytes - 40093,5 Bytes al valor de la imagen original (40992 Bytes). Sin embargo, para 200Mbps y 2Gbps no ocurrió lo mismo, en estos casos la gráfica de transmisión de datos fue más lineal. Esto se debe en gran parte a que con mayores datarates se transmite un mayor número de datos en el mismo tiempo, es decir para el data rate de 20Mbps, únicamente veinte millones de bits son procesados por segundo en cambio para 2Gbps se procesa un mayor número de bits, en el orden de Giga (exponente a la 9), lo que genera que la imagen presente una mayor calidad y su

tamaño sea constante sin presentar mayores cambios. en comparación con el data rate de 20Mbps, que presenta valores con algunos picos debido a que en este valor se procesa un menor número de datos.

A continuación, se presenta la radiografía de tórax original y las imágenes radiográficas que se transmitieron con los diferentes data rate en el software GNU Radio al simular la parte del enlace de radio del montaje general, es decir la señal eléctrica antes de ser utilizada por el modulador MZN (ver Figura 13).

Figura 30 Transmisión de una imagen radiográfica con diferentes data rate. A). Imagen original, B) imagen a 20Mbps, C). Imagen a 200Mbps, D). Imagen a 2Gbps.

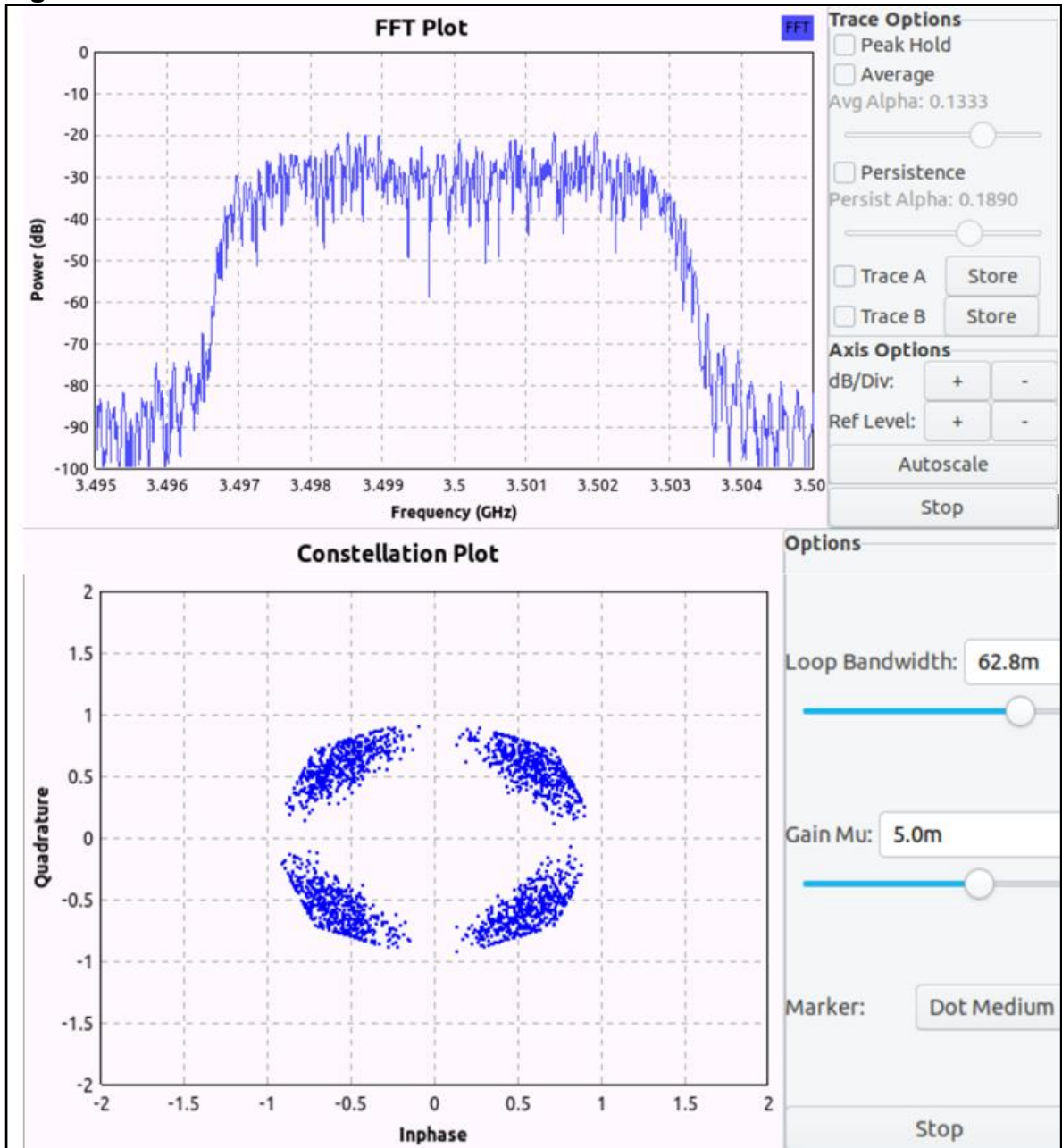


Fuente: Autor

En la Figura 30 se puede observar que la transmisión es efectiva, y la radiografía que se envía llega completa sin ninguna alteración de la imagen original. Además, a pesar que se tiene una pérdida de bits de hasta 1.151 Bytes con respecto a la original la imagen que se recibe es visible, y mantiene sus propiedades físicas, sin presentar distorsión o diferencias considerables en el color.

A continuación, en la Figura 31 se presentan los resultados obtenidos tanto del analizador de espectros como el diagrama de constelaciones en donde en un ambiente ideal (sin ruido), se observan 4 constelaciones definidas, es decir, se pueden identificar cuatro grupos de puntos que se encuentran concentrados e impactan en la misma zona. Esto se debe a que todos los símbolos son reconocidos por el demodulador, lo que indica que la comunicación es correcta y están siendo codificados 2 bits por cada símbolo.

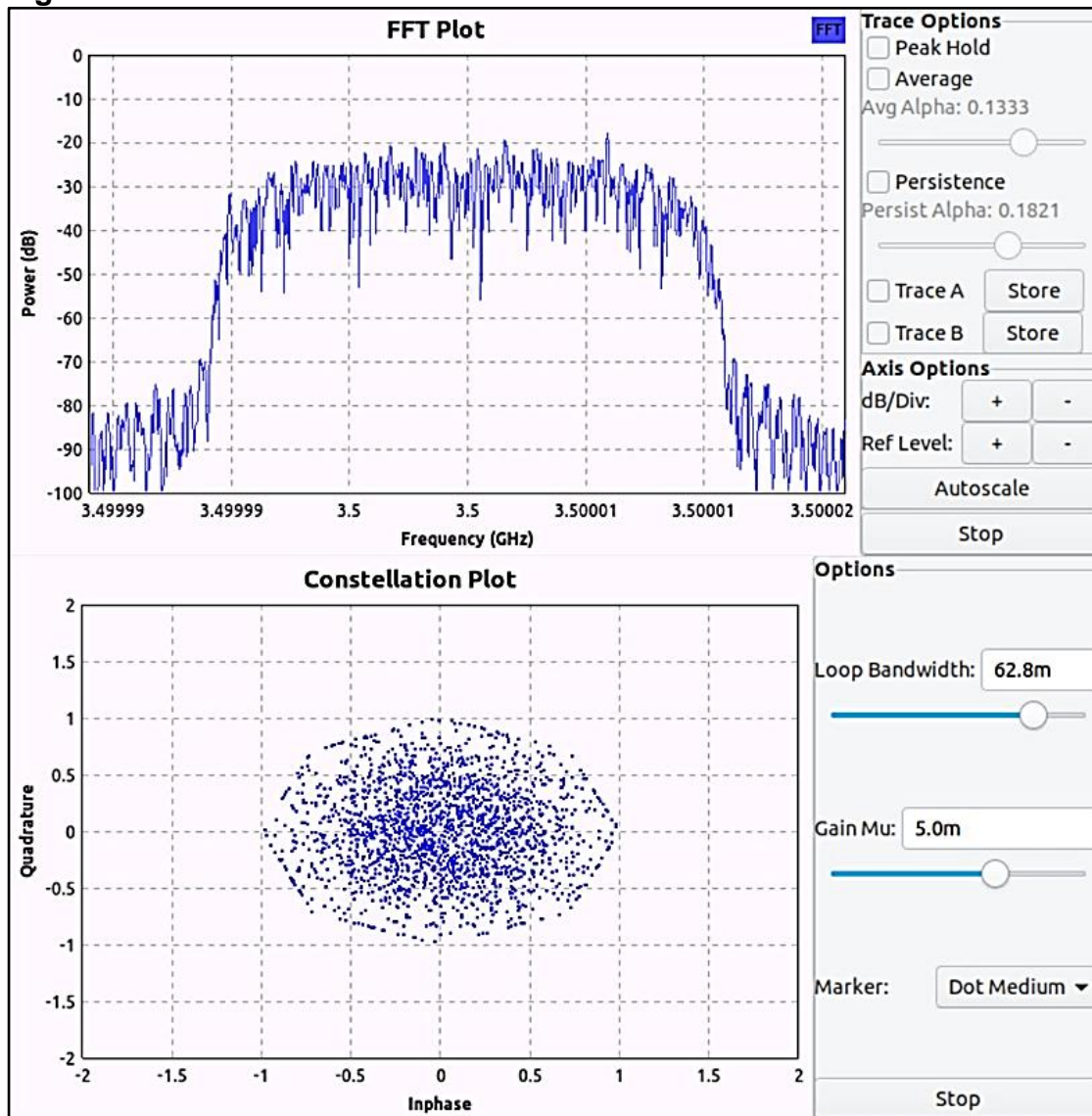
Figura 31. Gráfica de constelaciones sin ruido en GNU Radio.



Fuente: Autor

En cuanto al diagrama de constelaciones del enlace radio (con pérdidas), debido a que presenta una fuente de ruido en este caso de tipo Gaussiano (ver Figura 25), el cual es el ruido con más problemas cuando se desea modular y demodular una señal ya que tiende a empeorar la transferencia de datos. En la Figura 32 se comprueba lo mencionado anteriormente con el diagrama de constelación, por lo que cuando el ruido gaussiano presenta una amplitud de -1 o mayor, el demodulador no lee correctamente los bits, provocando que la constelación empeore, y el impacto de cada punto sea aleatorio, es decir se disperse por todo el centro del diagrama, haciendo que no se tenga un diagrama de constelación definido.

Figura 32. Gráfica de constelaciones con ruido en GNU Radio.



Fuente: Autor

Por otra parte, para evaluar la calidad del radio enlace es necesario utilizar el esquema de la tasa de error de bits, obteniendo los siguientes resultados:

En la Tabla 9, se presenta los datos de la tasa de error de bits realizada con la simulación de la Figura 26 en donde los valores se encuentran entre 209584e-06 y 263083e-06, en este caso los datos presentan un exponente cercano a -6 indicando que el canal es bueno y por lo tanto existe una transmisión de datos.

Tabla 9. Tasa de error de bits con data rate de 20Mbps en GNU-Radio

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	263083e-06
2	217388e-06
3	243327e-06
4	251645e-06
5	226269e-06
6	218373e-06
7	246015e-06
8	227406e-06
9	209584e-06
10	212198e-06
Promedio de resultados	231528e-06

Fuente: Autor

En la Tabla 10 se encuentran los datos obtenidos de la simulación de tasa de error con 200Mbps en este caso los datos cuentan con un rango entre 327306e-06 y 365714e-06, presentando valores mayores en comparación con la Tabla 9. Además, el exponente no varía, sino que sigue en el orden de -06, indicando que en este punto sigue existiendo una buena comunicación del sistema.

Tabla 10. Tasa de error de bits con data rate de 200Mbps en GNU-Radio

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	363826e-06
2	355830e-06
3	327306e-06
4	348638e-06
5	344664e-06
6	365714e-06
7	330629e-06
8	356899e-06
9	359298e-06
10	353452e-06
Promedio de resultados	350625e-06

Fuente: Autor

Para la Tabla 11 los datos se mantienen con un promedio de tasa de error de bits de $455079e-06$, es decir este valor es más grande que en los datos anteriores, lo que indica que cuando se envía la imagen de la radiografía de torác los bits están siendo demodulados correctamente por el bloque psk y desempaquetados por el bloque packet decoder, obteniendo una cadena de bits con menores pérdidas y cercana al archivo original.

Tabla 11. Tasa de error de bits con data rate de 2Gbps en GNU-Radio

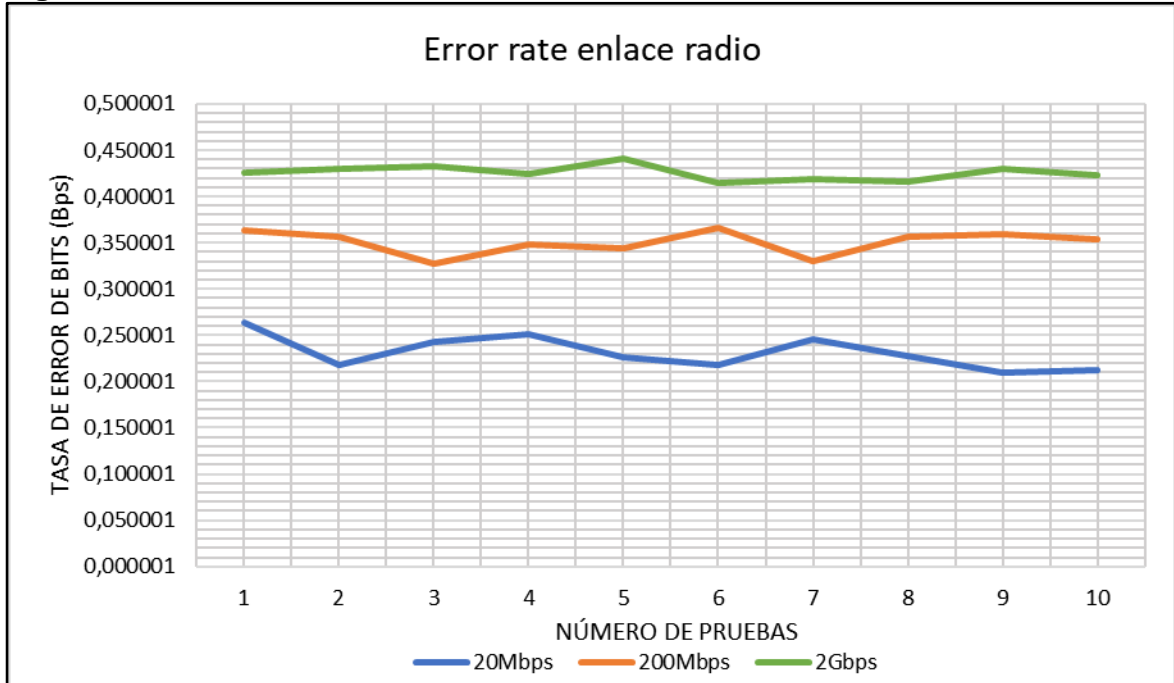
No. de pruebas	Tasa error de bits
1	425822e-06
2	430008e-06
3	432534e-06
4	424142e-06
5	440320e-06
6	414862e-06
7	419002e-06
8	416508e-06
9	429222e-06
10	423307e-06
Promedio de resultados	455079e-06

Fuente: Autor

Con respecto a los valores de las tablas 9,10 y 11 se procede a realizar su respectiva gráfica con el objetivo de visualizar la tasa de error solamente del enlace radio.

En la Figura 33 se observa el error rate para 20Mbps, 200Mbps y 2Gbps, en este caso cuando se envía la imagen con 20Mbps (promedio de $231528e-06$), la tasa de error de bits en comparación con los valores de 200Mbps (promedio de $350625e-06$) y 2Gbps (promedio de $455079e-06$) es más cercana a cero, por lo que en el enlace radio con data rate más altos existe un mayor número de pérdida de bits. Resaltando que esto se debe a que el enlace radio se encuentra en un escenario libre de ruido.

Figura 33. Tasa de error de bits del enlace radio en GNU-Radio



Fuente: autor

5.2 RESULTADOS OPTISYSTEM

Por otra parte, con el software OptiSystem se utilizó el data rate más alto del software GNU radio de 2Gbps y se hicieron nuevas pruebas con data rate más altos como: 15Gbps, 20Gbps, 100Gbps y 250Gbps que es el valor más alto que se puede configurar en el software OptiSystem ya que solo permite valores entre 0.25Gbps y 250Gbps.

En la Tabla 12 los valores presentan exponentes altos entre un rango entre -304 y -319, esto indica que los valores son cercanos a 0. Además, según la Universidad Nacional Experimental de la Fuerza Armada, menciona que una tasa de error aceptable para una transmisión es 10 elevado a la -6^{107} . Por lo que en promedio se tiene una tasa de error de bits de $3,77088e-300$ lo que da a entender que la comunicación del enlace es buena.

¹⁰⁷ "CODIFICACIÓN DE CANAL PARA EL CONTROL DE ERRORES. - Unefa Curso de Comunicaciones," accessed May 10, 2020, <https://sites.google.com/site/unefacursodecomunicaciones/codificacin-de-canal-para-el-control-de-errores>.

Tabla 12. Tasa de error de bits con data rate de 15Gbps a 10Km en OptiSystem

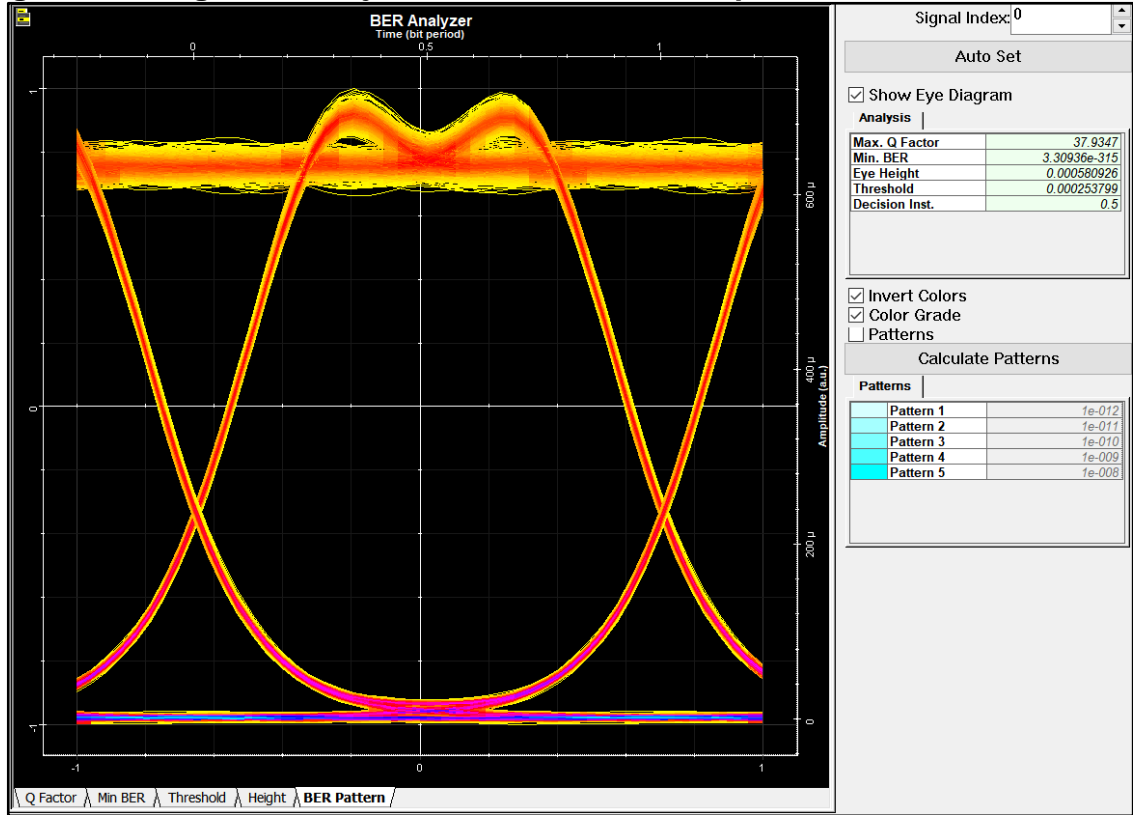
No. de pruebas	Tasa error de bits
1	5,53887e-319
2	2,15278e-307
3	1,88535e-299
4	1,80877e-317
5	1,89985e-310
6	3,29683e-307
7	9,48226e-304
8	3,84472e-307
9	3,30936e-315
10	3,33114e-312
Promedio de resultados	3,77088e-300

Fuente: Autor

Por otra parte, los resultados mencionados anteriormente sobre la tasa de error de bits también se pueden interpretar mediante el diagrama de ojo. A continuación, se obtiene la imagen de los diagramas de BER que se consiguieron para el data rate de 15Gbps en OptiSystem.

Como se mencionó anteriormente con un data rate de 15Gbps la transmisión de información es adecuada ya que se cuenta con una tasa de error de bits cercana a 0, como se observa en la Figura 34, la cual presenta como mínimo BER el valor de 3,30936e-315. Esto genera que en el diagrama de ojo se encuentre completamente abierto y despejado en el centro.

Figura 34. Diagrama de ojo con data rate de 15Gbps



Fuente: Autor

Por otra parte, para la Tabla 13 los valores obtenidos varían entre $1,37006e-272$ y $5,57347e-289$, presentando un exponente mayor a 10 elevado a la -6. Lo que significa que la comunicación es bastante buena pues su exponente en promedio es de -273 y por ende se perderán un menor número de bits durante la transmisión.

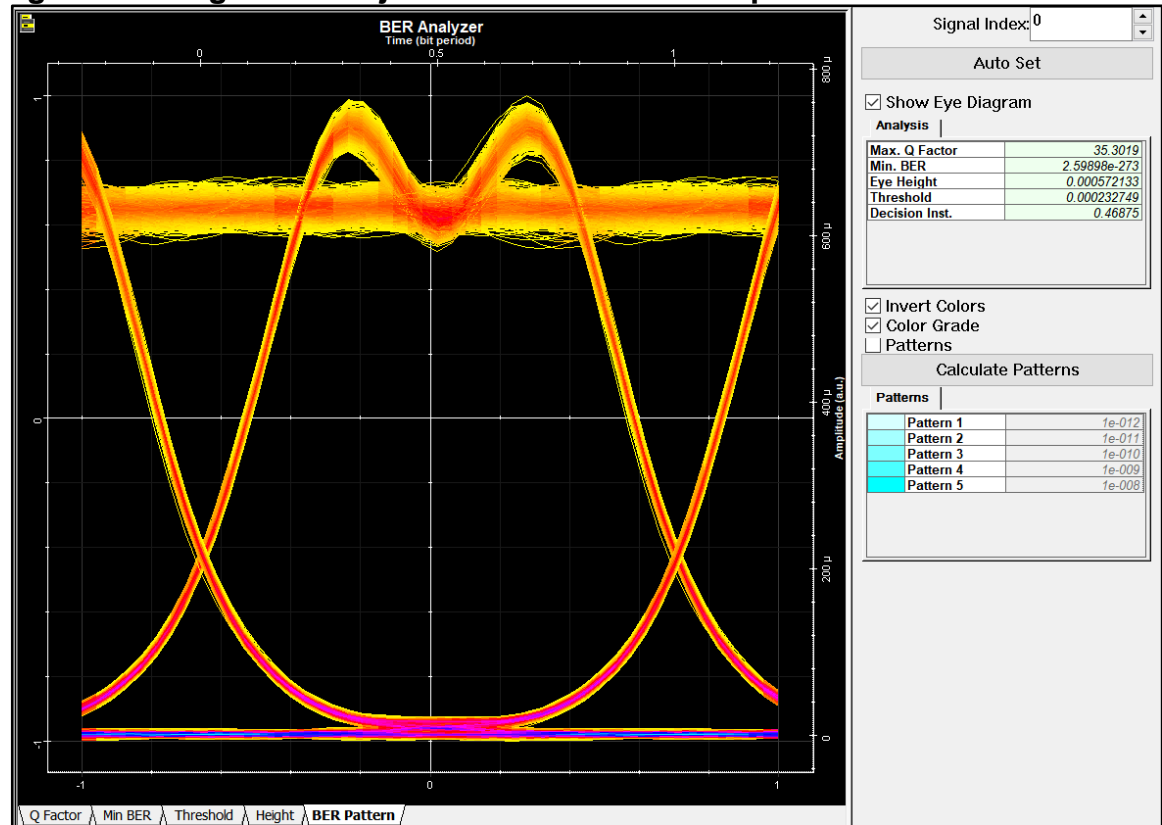
Tabla 13. Tasa de error de bits con data rate de 20Gbps en OptiSystem.

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	5,57347e-289
2	1,37006e-272
3	1,07488e-274
4	3,07839e-272
5	1,37933e-272
6	4,33177e-275
7	4,86946e-277
8	2,59898e-273
9	1,14903e-287
10	3,05804e-273
Promedio de resultados	6,13338e-273

Fuente: Autor

Estos datos presentados en la Tabla 13 se evidencian en la Figura 35, que a pesar de que el exponente en promedio disminuyo pasando de -300 a -273, sigue siendo un valor muy cercano a cero. Razón por la cual el diagrama de ojo sigue luciendo definido, amplio y sin obstrucciones en el centro. Como era de esperarse con esta velocidad se garantiza una buena transmisión de datos con una tasa de error promedio de $6,13338e-273$.

Figura 35. Diagrama de ojo con data rate de 20Gbps



Fuente: Autor

En cuanto a los datos de la Tabla 14 al igual que en la Tabla 13 los valores obtenidos también presentan un exponente mayor de 10 elevado a la -6, en este caso al aumentar el data rate se puede apreciar una reducción considerable del exponente pasando de -273 a -36, no obstante, la comunicación con un data rate de 100Gbps sigue siendo adecuada a pesar de existir posibles pérdidas en la transmisión.

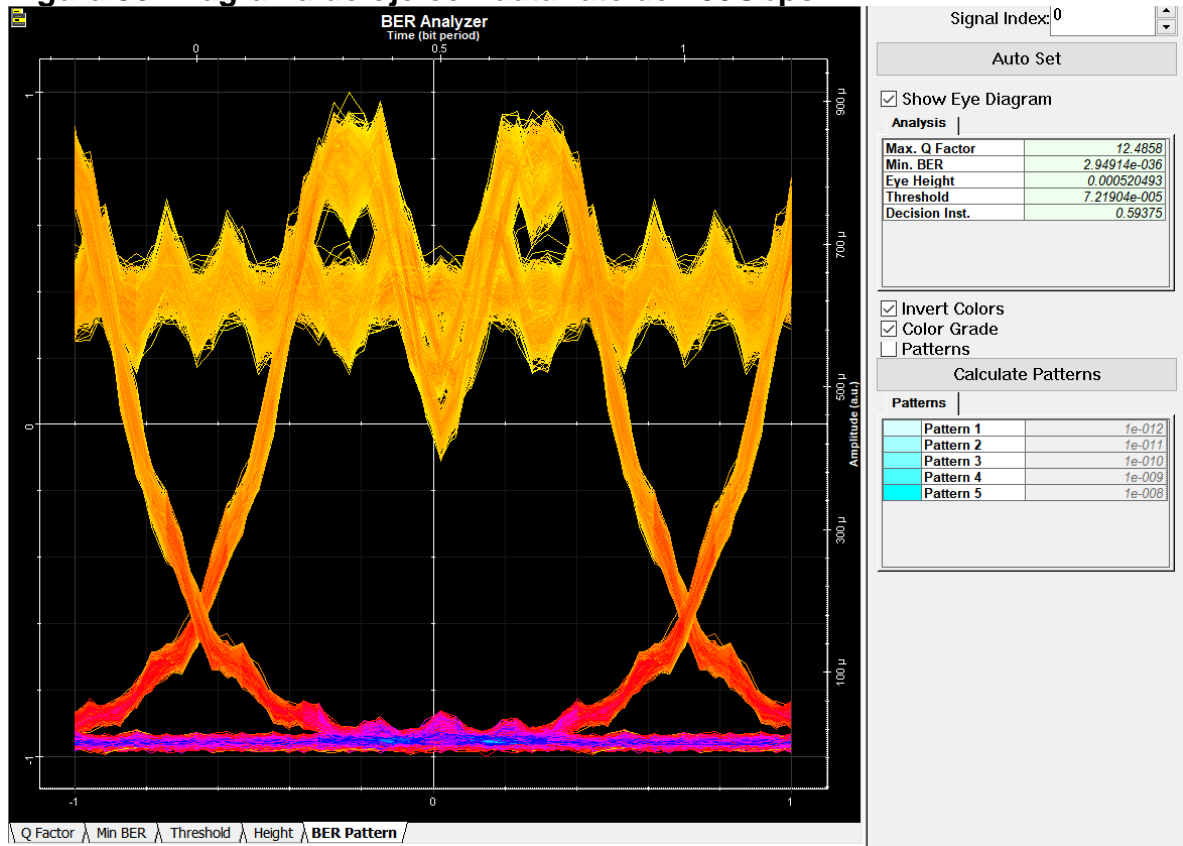
Tabla 14. Tasa de error de bits con un data rate de 100Gbps en OptiSystem.

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	1,25569e-036
2	1,26674e-036
3	4,19978e-036
4	6,39451e-036
5	7,87898e-036
6	7,43356e-036
7	2,29515e-036
8	2,94914e-036
9	2,39833e-036
10	2,06587e-036
Promedio de resultados	3,81077e-036

Fuente: Autor

Estas pérdidas de bits se evidencian en la Figura 36, donde se presenta un diagrama de ojo que cuenta con un mínimo BER de 2,94914e-036. Cabe resaltar que entre mayor sea la distancia entre las líneas horizontales (la línea amarilla y la línea rosada) se obtiene un mejor canal de comunicación. Por lo que entre mayor sea la distancia ente estas líneas horizontales y más despejada se encuentre la zona del centro mejor se puede observar la forma de ojo, dando como resultado un menor número de pérdidas producto de la transmisión de datos. Para este data rate de 100Gbps a pesar del diagrama de ojo no se encuentra abierto por completo, al tener un BER cercano a cero se puede garantizar que existe comunicación en el canal de transmisión con pérdidas aceptables, en promedio de 3,81077e-036.

Figura 36. Diagrama de ojo con data rate de 100Gbps.



Fuente: Autor

Finalmente, en la Tabla 15 al igual que en la Tabla 14 se observa que los exponentes de la tasa de error de bits permanecen constantes, en este caso el valor es de -31. Además, al igual que ocurrió en los anteriores casos, los datos cumplen con un exponente mayor a 10 elevado a la -6, por lo que es posible que existan pérdidas de datos con menor proporción al momento de la transmisión.

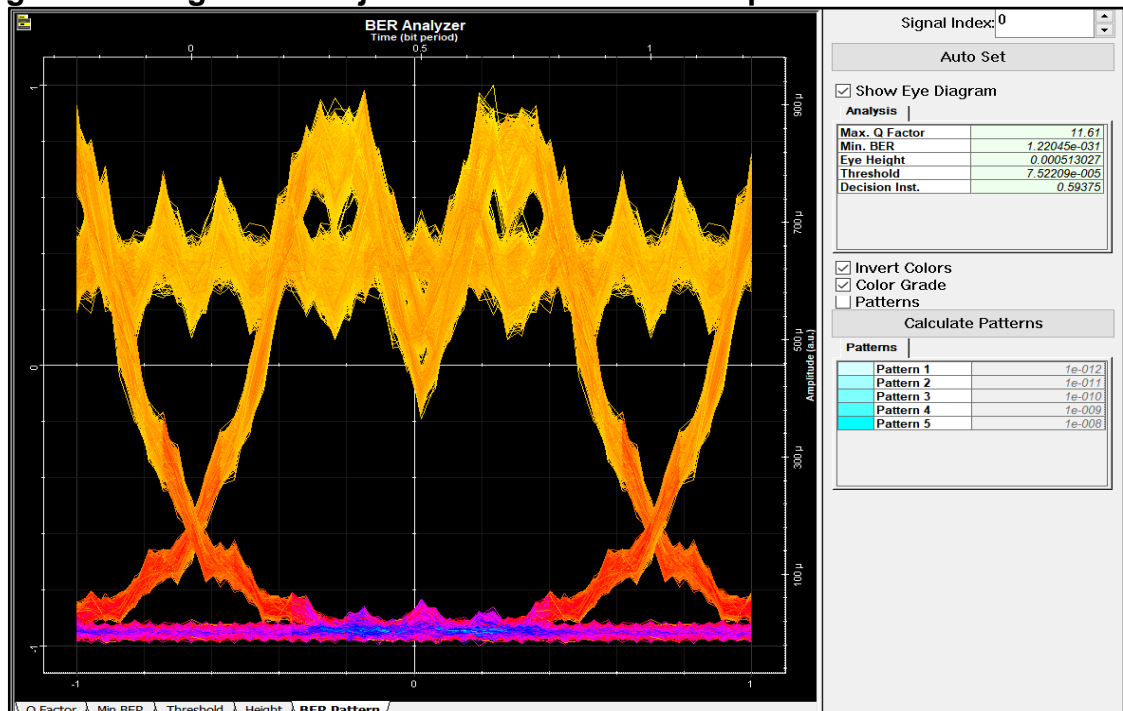
Tabla 15. Tasa de error de bits con velocidad de 250Gbps en OptiSystem.

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	1,22045e-031
2	1,19562e-031
3	1,00948e-031
4	1,37505e-031
5	1,28369e-031
6	3,38907e-031
7	1,45438e-031
8	1,36499e-031
9	1,32187e-031
10	1,12873e-031
Promedio de resultados	1,47333e-031

Fuente: Autor

Con respecto a los datos obtenidos anteriormente, estas pérdidas de bits se observan con el diagrama de ojo de la Figura 37, donde a pesar de que se observan distorsiones en la señal y no se tiene una zona del centro libre, se tiene un mínimo BER de 1,22045e-031 cercano a cero lo que permite que con un data rate de 250Gbps sea aceptable la transmisión del sistema a pesar de que en el diagrama no presente en su totalidad la forma definida del ojo.

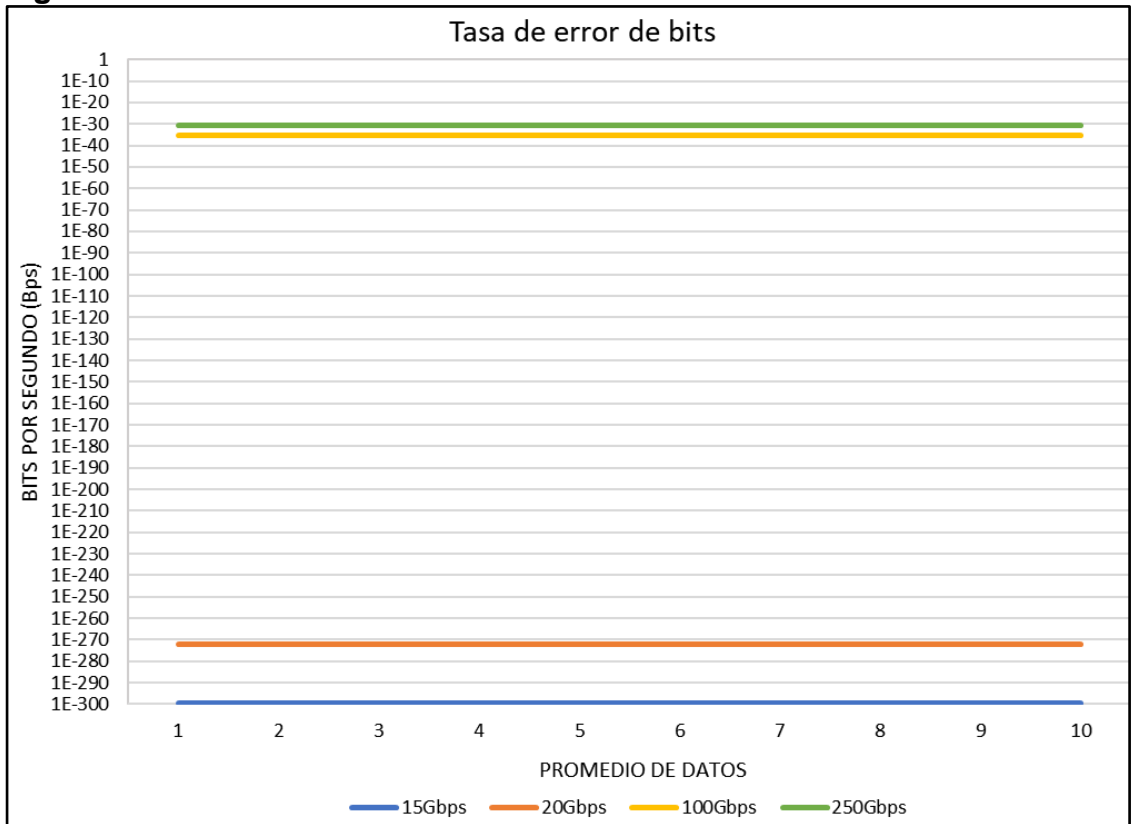
Figura 37. Diagrama de ojo con data rate de 250Gbps



Fuente: Autor

A continuación, una vez se obtienen los resultados del promedio de la tasa de error de bits, se procede a graficar el promedio de los datos para los 4 data rate (15Gbps, 20Gbps, 100Gbps y 250Gbps) en un solo diagrama para su posterior análisis.

Figura 38. Tasa de error de bits con diferentes velocidades de muestreo.



Fuente: Autor

En la Figura 38 se tomaron los datos obtenidos del promedio de 10 números de pruebas y se comprobó que en este caso la mejor velocidad para transmitir los datos es de 15Gbps pues la tasa de error de bits en promedio es muy cercana a 0 con un exponente de -300 mayor al de las otras velocidades, no obstante también la velocidad de 20 Gbps es una buena opción para transmitir los datos y que lleguen con el mayor número de bits. Caso contrario a lo que ocurre con los data rate de 100Gbps y 250Gbps, en estos valores el exponente es menor por lo que la tasa de error de bits no se acerca a 0 sino a 1, lo que resulta ser desfavorable pues se obtiene un canal de transmisión con una mayor pérdida de bits.

Así mismo, con la gráfica de tasa de error de bits se puede comprobar que a mayores velocidades de transmisión se presentan mayores pérdidas de datos por lo que su exponente suele ir disminuyendo cada vez más hasta ser cercano a 1, valor que indica que no se cuenta con un buen sistema de comunicación.

Por otra parte, como se observó anteriormente el mejor data rate con menos pérdidas fue de 15 Gbps. Es por esta razón que se selecciona este valor con el fin conocer el alcance máximo de transmisión del canal, para ello se utilizan las siguientes distancias: 20Km, 30Km y 70Km, comprendidas en un rango entre 10Km y 100km (rango de distancia en promedio que se encuentra el especialista y el paciente dentro de una misma ciudad), obteniendo los siguientes datos:

Para la Tabla 16 se presenta el resultado de la tasa de error de bits que existe cuando se varía la distancia de 20Km, esta distancia es cercana a 10Km. Sin embargo, se observa que el exponente disminuye pasando de un promedio de $3,77088e-300$ como lo indica la Tabla 12 a un promedio de datos de $6,56e-061$, esto comprueba que existe una relación entre la distancia del enlace y la cantidad de información que se puede transmitir.

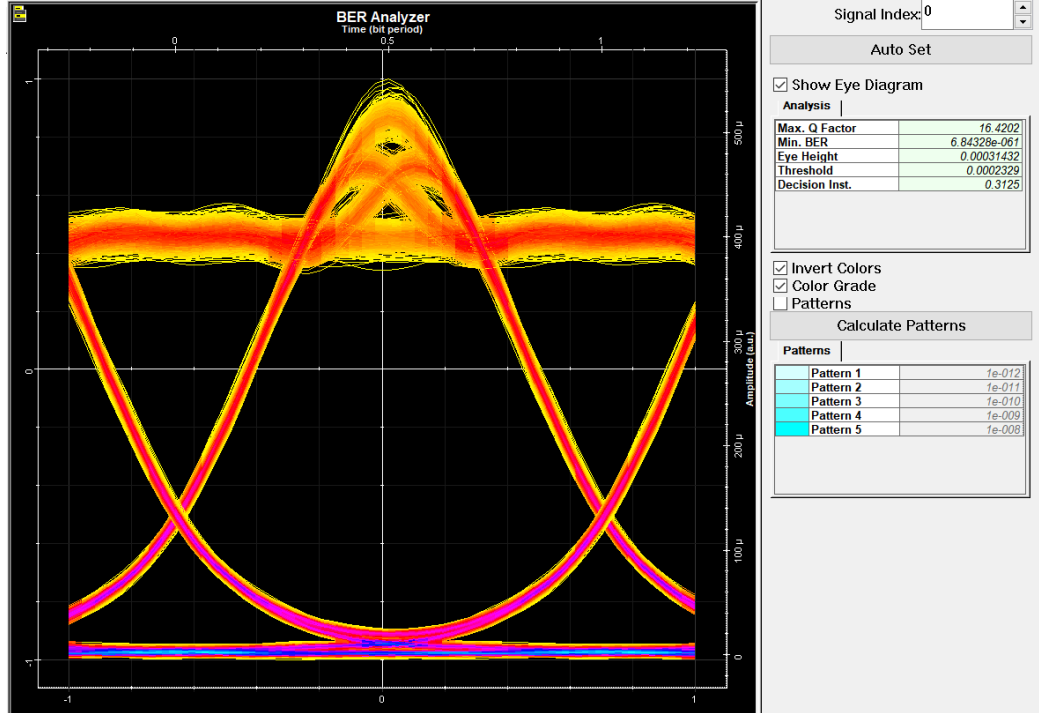
Tabla 16. Distancia de 20Km con un data rate de 15Gbps

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	6,28674e-061
2	2,44891e-061
3	6,84328e-061
4	1,91997e-061
5	6,29502e-061
6	1,13589e-061
7	1,13598e-061
8	1,33647e-061
9	2,83478e-061
10	2,11212e-061
Promedio de resultados	3,23491e-061

Fuente: Autor

Con respecto a lo mencionado anteriormente, como se observa en la Figura 39 existen diferencias cuando se varía la distancia entre ellas que la señal sobrepasa la línea superior horizontal, lo que indica mayor número de errores a causa de la dispersión de la fibra óptica cuando se aumenta la distancia. Sin embargo, esto no impide que el centro del diagrama de ojo se encuentre totalmente despejado, lo que indica que el estado de transmisión del canal sigue siendo adecuado con un promedio de resultados de $3,23491e-061$.

Figura 39. Diagrama de ojo con distancia de 20Km.



Fuente: Autor

Por otra parte, la Tabla 17 presenta los datos obtenidos cuando se varía la distancia a 30 Km una distancia 3 veces mayor que la inicial (10Km) en este caso el promedio de tasa de error de bits resulta ser de 3,89685e-025. Resaltando que el exponente es menor de -25 en comparación con las distancias de 10 km y 20km. No obstante, la calidad del sistema de comunicación sigue siendo buena al tener un exponente mayor que -6 (valor que indica el estado de transmisión de un canal de un sistema de transmisión digital).

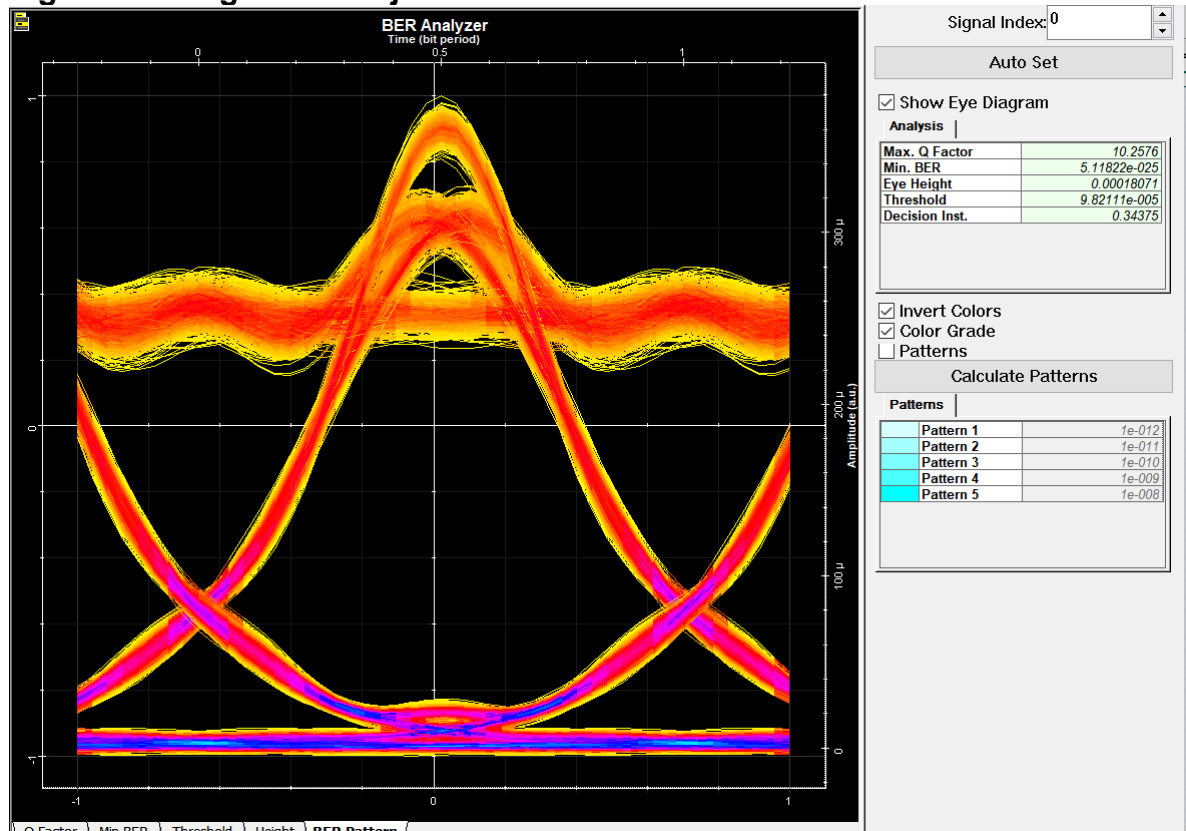
Tabla 17. Distancia de 30Km con un data rate de 40Gbps

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	6,02656e-025
2	2,03593e-025
3	5,11822e-025
4	3,31051e-025
5	5,33537e-025
6	2,72288e-025
7	3,26556e-025
8	2,62606e-025
9	6,60195e-025
10	1,92555e-025
Promedio de resultados	3,89685e-025

Fuente: Autor

En cuanto al diagrama de ojo de la Figura 40, con una distancia 3 veces mayor que la inicial se tiene una señal que presenta un mayor número de pérdidas de bits en comparación a las distancias de 10km y 20Km, esto se relaciona en gran parte al aumento de la distancia ya que se debe tener en cuenta que el tiempo que se demora la señal óptica en recorrer la fibra es mayor y por lo tanto se pueden presentar perdidas asociadas a la dispersión.

Figura 40. Diagrama de ojo con distancia de 30Km.



Fuente: Autor

Por otra parte, en la Tabla 18 se tiene una tasa de error de bits con un valor promedio de $7,10982e-010$. Donde, en comparación con las anteriores distancias este exponente más cercano a -6, valor del umbral para tener una buena la calidad del sistema de transmisión, lo que indica que se encuentra cerca la distancia máxima para que el exponente sea menor a -6.

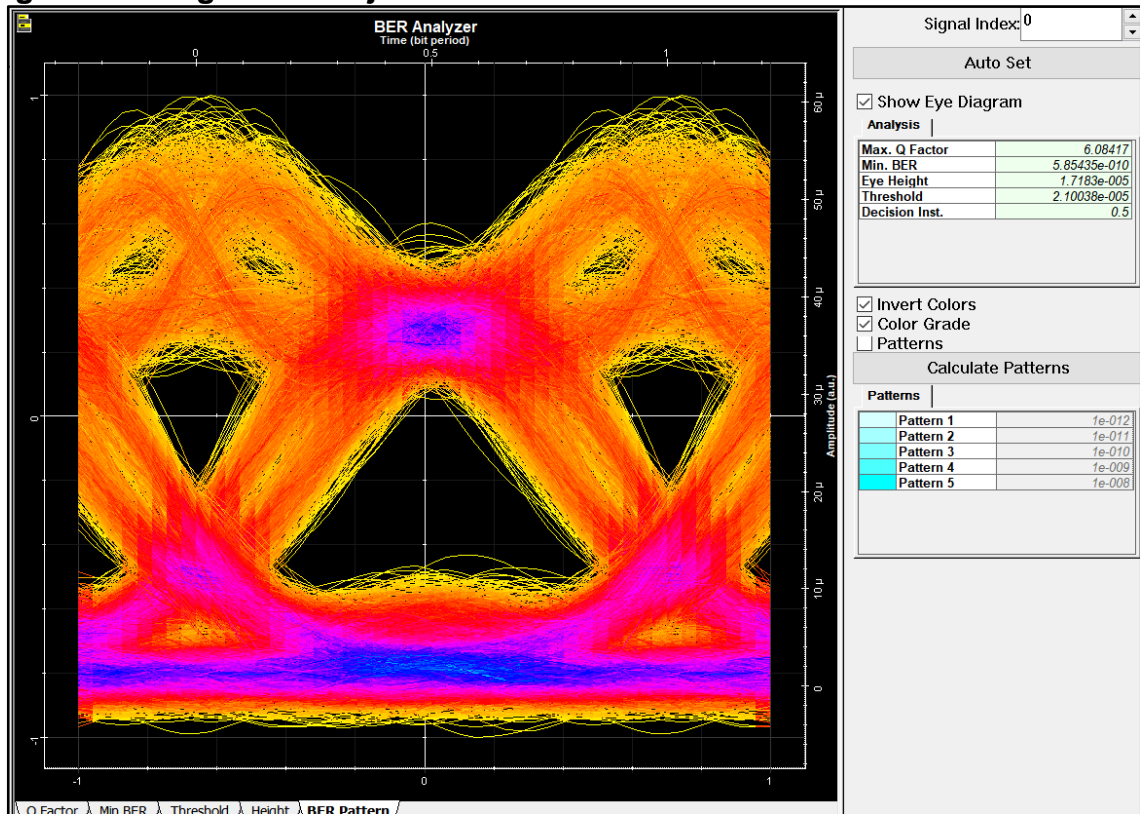
Tabla 18. Distancia de 70Km con un data rate de 40Gbps

No. de pruebas	Tasa error de bits
1	7,91182e-010
2	8,99133e-010
3	4,79028e-010
4	5,85435e-010
5	6,98487e-010
6	8,02111e-010
7	7,43297e-010
8	8,65712e-010
9	7,87712e-010
10	4,57729e-010
Promedio de resultados	7,10982e-010

Fuente: Autor

En la Figura 41 se dificulta mantener una buena amplitud entre las líneas horizontales por lo que en este caso el ojo se cierra manteniendo una menor área despejada en el centro, lo que indica que en este punto el canal está próximo a dejar de ser un sistema aceptable para la transmisión de datos.

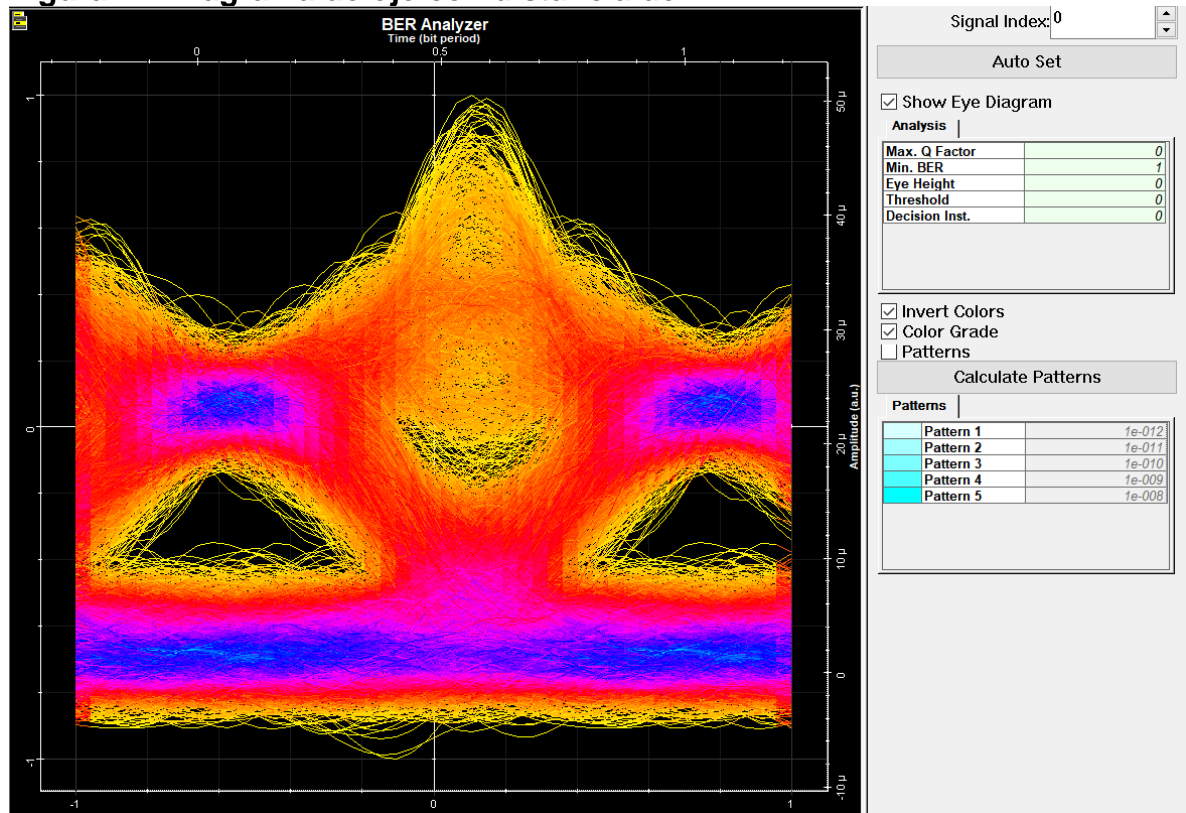
Figura 41. Diagrama de ojo con distancia de 70Km



Fuente: Autor

Después de los cálculos para 70km se comprueba que a partir de esta distancia la tasa de error de bits es 1, por lo tanto, después de este valor se pierde la transmisión de la señal por completo como se observa en la Figura 42, donde se aprecia que el diagrama de ojo se encuentra completamente cerrado sin ningún espacio despejado en el centro.

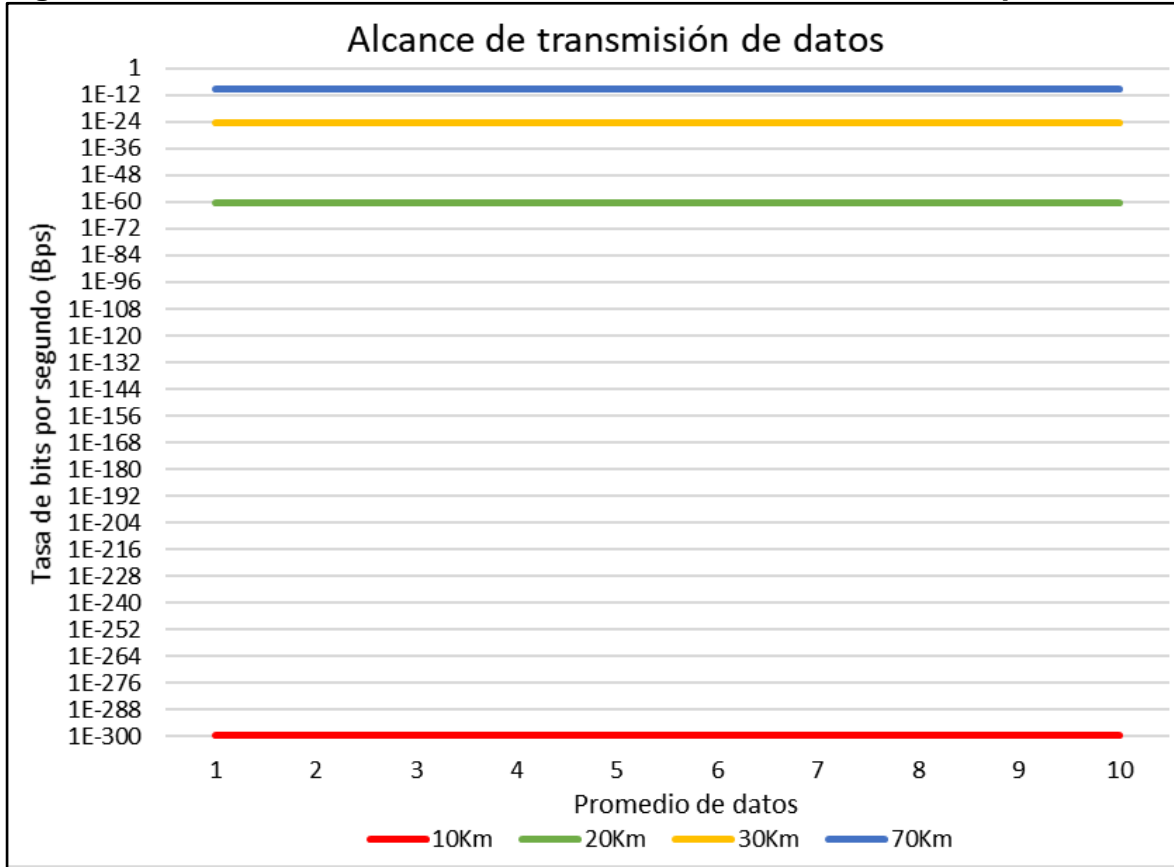
Figura 42. Diagrama de ojo con distancia de 71Km.



Fuente: Autor

Con respecto a los datos obtenidos se realizó una gráfica comparando la distancia inicial de 10km con distancias mayores como 20Km, 40Km y 70km presentando los siguientes resultados:

Figura 43. Alcance de transmisión variando la distancia de fibra óptica



Fuente: Autor

En la Figura 43 se aprecia 4 distancias, en donde a medida que se aumentan estos valores, la tasa de transmisión se vuelve cercana a 1, haciendo que se pierda la calidad del sistema. Del mismo modo, con los resultados obtenidos se observa que cuando la distancia es 2 veces mayor a la inicial su exponente disminuye a -60, cuando es 3 veces mayor su exponente disminuye a -25 y cuando es 7 veces mayor disminuye a -10, es decir existe una relación inversamente proporcional entre la distancia y la tasa de error de bits. Resaltando, que después de 70km la tasa de error de bits es de 1 por lo que no existe un buen sistema de transmisión de datos.

Por otra parte, con el esquema del montaje general descrito en la Figura 13, la distancia de 70Km resulta ser un buen valor para transmitir información entre la estación base y la estación central. Resaltando que por lo general el paciente se encuentra en lugares apartados. Por lo que este valor resulta ser ideal para comunicar un especialista y un paciente que se encuentre en la periferia de la misma ciudad o para comunicar hospitales centrales en zonas urbanas con hospitales rurales.

5.3 RESULTADOS GENERALES

Haciendo un recuento de este capítulo los resultados obtenidos en la simulación del software GNU-Radio en donde se transmitió la imagen de la radiografía de torácax fue con el propósito de ver el comportamiento únicamente del enlace radio, es decir que la señal eléctrica que se está modulado se recibe correctamente sin alterar el menor número de bits de la imagen radiográfica que se están transmitiendo, una vez se conocieron los data rate alcanzados por el software GNU-Radio, se realizó la simulación del enlace óptico presentado en la Figura 13 con el Software OptiSystem, observando cuál es el mejor BER (Tasa de error de bits) que se presenta con data rates más altos, resaltado que si el BER es cercano a cero se tendrá un menor número de pérdidas de bits de la información que se está transmitiendo en este caso la imagen radiográfica, lo cual resulta ser una ventaja para no comprometer la fidelidad de la transmisión.

Así mismo, con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos específicos se realizaron las siguientes actividades:

Para el primer objetivo se tiene en cuenta el capítulo de generalidades en donde se realiza un estado del arte con algunos artículos sobre telemedicina, imágenes diagnósticas y tecnología de radio sobre fibra.

Para el segundo objetivo se tiene en cuenta el capítulo de imágenes para telediagnóstico, en el cual se presenta la información sobre las características físicas de una imagen cardiorrespiratoria.

Para el tercer objetivo se tiene en cuenta el capítulo radio sobre fibra y simulación, donde se encuentra el esquema general del enlace radio sobre fibra junto con la descripción de cada uno de los componentes utilizados para la simulación.

Para el último objetivo se tiene en cuenta el quinto capítulo que contiene el análisis de los resultados obtenidos a partir del software GNU-Radio y OptiSystem donde se realiza la gráfica de alcance de transmisión de datos que determina la distancia máxima de transmisión del sistema.

CONCLUSIONES

Durante el diseño del enlace radio sobre fibra para la transmisión de imágenes radiográficas fue necesario investigar sobre dos aspectos importantes el primero sobre los componentes generales que conforman un sistema radio sobre fibra los cuales consta en su etapa de transmisión de una señal óptica (Laser), una señal eléctrica, un modulador Mach-Zehnder conectado a un carrete de fibra óptica que simula el canal de conexión y en su etapa de recepción consta de un fotodiodo junto con un amplificador conectado a una antena. Para el segundo aspecto fue importante conocer e identificar las características de las imágenes radiográficas en neonatos, para ello se verifico el tamaño estándar de una radiografía de tórax el cual fue de 32MB, con una resolución de 4096x4096 pixeles. Resaltando que al ser el tórax una parte del cuerpo que genéticamente presenta grandes dimensiones en el caso de un neonato de 20cm a 24cm, este tipo de imágenes requieren una gran resolución y varía según el dispositivo que captura la imagen. Sin embargo, las resoluciones de 1024x1024 pixeles resultan ser insuficientes para su posterior análisis. Además, a diferencia de las radiografías convencionales, estas requieren de 16 bits de profundidad que da como resultado 65.536 tonos de grises con los cuales se puede distinguir en la imagen los huesos, tejido blando y arterias.

Por otra parte, uno de los problemas que se presentan al transmitir una imagen diagnóstica es que no se pierda la información, es decir que los mismos bits que se envían sean los mismos bits que se reciben, estas pérdidas de bits pueden ser mayores o menores, dependiendo del tipo de modulación que se utilice. Resaltando, que para el enlace radio se utilizó una modulación de fase (PSK) lo que permitió enviar y recibir la señal, sin comprometer las propiedades físicas de la radiografía de tórax. Así mismo, para la modulación de la señal con un canal de fibra óptica fue necesario una modulación de intensidad (NRZ), consiguiendo pocas perdidas de bits no mayores a 1bps de la secuencia inicial de dígitos binarios.

Con respecto a lo mencionado anteriormente, un factor importante para conocer la calidad de la transmisión es analizar el mínimo BER (Tasa de error de bit), mediante el diagrama de ojo. Lo que dio como resultado que a una comunicación de 15Gbps se obtiene el BER más alto en promedio de $3,77088e-300$ y por ende un diagrama de ojo adecuado, en comparación con los demás resultados cuyo mínimo BER en promedio se acercaba a -6 como es el caso de 100Gbps y 250Gbps, impidiendo que la forma del diagrama de ojo fuera amplia y con el centro despejado. Así mismo según los resultados obtenidos se puede decir que el prototipo del enlace radio sobre fibra es un sistema de comunicación funcional que presenta un buen rendimiento en su transmisión y su tasa de error de bits es cercana a cero.

Finalmente, en un enlace radio sobre fibra al utilizar una modulación de intensidad pueden existir problemas debido a la dispersión cromática y los efectos no lineales, lo que no ocurre en un enlace radio. Sin embargo, una ventaja de implementar la fibra óptica es que mediante la modulación óptica es más efectivo el uso del espectro disponible, generando un mayor ancho de banda. Resaltando que para redes 5G se requieren nuevas aplicaciones que puedan transportar datos con data rate altos, en este caso el enlace radio sobre fibra cuenta con un data rate de 250Gbps, no obstante, el data rate del enlace completo con mejor transmisión fue de 15Gbps y cuyo alcance máximo de transmisión de datos fue de 70km con una tasa de error de bits promedio de $7,10982e-010$ bps.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado, se simuló un enlace radio sobre fibra para la transmisión de imágenes cardiorrespiratorias en una sola dirección con el propósito de brindar una herramienta al paciente que necesita de un diagnóstico especializado de imágenes médicas, en este caso para recién nacidos. Sin embargo, con el objetivo de obtener mejores resultados se hacen las siguientes recomendaciones:

- Diseñar y hacer pruebas de un enlace radio sobre fibra para transmitir imágenes con una comunicación full dúplex.
- Verificar las características que presentan las imágenes médicas para otro tipo de enfermedades con el fin de que el enlace radio sobre fibra pueda transmitir imágenes de diferentes modalidades no solamente radiografías.
- Realizar nuevas pruebas de transmisión para enviar varias imágenes en un mismo archivo.

Por otra parte, debido a la situación actual del mundo con la llegada del virus Covid-19 se espera recurrir a la telemedicina, para poder acceder a un diagnóstico remoto exceptuado enfermedades que requieran de un equipo médico en específico. Esto con el propósito no afectar el sistema de salud con enfermedades de menor riesgo por lo que a futuro este trabajo puede ser la base para un sistema integrado de teleconsulta médica donde no solamente se pueda transmitir imágenes sino voz, archivos y videos.

Del mismo modo, con respecto al trabajo de grado realizado se espera que sea un punto de partida, para futuras investigaciones basadas en la tecnología 5G, con el objetivo de simular y diseñar nuevas aplicaciones en tiempo real. Un ejemplo es en Colombia que está preparándose para la implementación de las redes 5G por lo que se espera utilizar las ventajas que presenta esta tecnología, en cuanto a ancho de banda, alta velocidad, poca latencia y menor costo para ofrecer nuevas aplicaciones de telemedicina. Así mismo para trabajos futuros se recomienda diseñar un enlace radio sobre fibra para frecuencias mayores de 3.5GHz, con el fin de disminuir la latencia del sistema.

ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN

Para transmitir los resultados y que estos puedan ser apropiados por la sociedad se realizaron las siguientes actividades:

1. Se presentó el trabajo “sistema radio sobre fibra para transmisión de imágenes tipo radiografía” en TechFest que se desarrolló el día 27 de septiembre de 2019 en la universidad San Buenaventura.
2. Se presentó el trabajo “sistema radio sobre fibra para transmisión de imágenes tipo radiografía” en el 1er. Encuentro de la Red Internacional de Investigación ERII, en el Marco de la X Jornada de Investigación Institucional, realizado por la universidad Católica de Colombia en los días 11 al 13 del mes de septiembre del año 2019.
3. Se realizó un artículo con los resultados del proyecto para ser postulado en el evento de IEEE Latincom que se va a realizar los días del 18 al 21 de noviembre de 2020.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceves, Tomás. "ADMINISTRACIÓN DE PLANTAS MÉDICAS HOSPITALARIAS." México, November 23, 2015. [https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/115/1/Tesis Tomás Aceves Jaime.pdfv](https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/115/1/Tesis%20Tomás%20Aceves%20Jaime.pdfv).
- Adambounou, Kokou, Victor Adjenou, Alex P. Salam, Fabien Farin, Koffi Gilbert N'Dakena, Messanvi Gbeassor, and Philippe Arbeille. "A Low-Cost Tele-Imaging Platform for Developing Countries." *Frontiers in Public Health* 2, no. SEP (September 5, 2014). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00135>.
- Adimen. "INFORMÁTICA BÁSICA LIBRE CONFIGURACIÓN II, ITIG E ITIS." Accessed April 29, 2020. https://adimen.si.ehu.es/~rigau/teaching/EHU/ISHAS/AltresCursos/Jaumel/Tema2_06-07.pdf.
- Aguilera Arreaga, Luis. "Análisis Comparativo Del Rendimiento de Los Moduladores MachZehnder y Electroabsorción Para Comunicaciones Ópticas." Guayaquil, September 24, 2018. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11146/1/T-UCSG-POS-MTEL-111.pdf>.
- Alternativeto. "AlternativeTo - Crowdsourced Software Recommendations." Accessed May 18, 2020. <https://alternativeto.net/>.
- Aprende tic. "Tamaño y Peso de Las Imágenes." Accessed April 27, 2020. <https://sites.google.com/site/ticvalcarcel/optimizacion-de-imagenes-para-internet/tamano-y-peso-de-las-imagenes>.
- ARENAS, N., O. BLANCHARD, and P. L.M. PASI. "Tuberculosis de La Mama." *Anais Brasileiros de Ginecologia* 27, no. 3 (March 1, 1949): 197–204. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistamedicasuis/article/view/8197>.
- Ariza, Diana. "Tabla de Medidas Bebes Linea Primera Infancia Noe | Tabla de Medidas, Trajes Para Bebes, Medidas Antropometricas." Accessed May 11, 2020. <https://www.pinterest.es/pin/484770347368096395/>.
- Arreaga Ojedis, Irene; Vera Morocho, Jimmy. "ESTUDIO Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE BAJO COSTO PARA EMERGENCIAS UTILIZANDO SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR) Y SERVIDOR ASTERISK PARA APLICACIONES EN SITIOS DE BAJA COBERTURA." Guataquil, August 2019. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18074/1/UPS-GT002834.pdf>.
- Avendaño Fernandez, Eduardo, Jhon James Granada Torres, Ana María Cardenas Soto, and Neil Guerrero Gonzalez. "Análisis Del Impacto de La Conversión Analógica a Digital En El Desempeño de Sistemas RoF Digitalizado." *INGE CUC* 15, no. 1 (March 23, 2019): 77–88. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.1.2019.07>.
- Barros, Jose. "Tamaño de Imagen, Resolución y Dimensiones | Jota Barros." Accessed May 21, 2020. <https://jotabarros.com/aprende-fotografia-tamano-imagen-resolucion-tamano-fisico/>.
- BROWSE ENCYCLOPEDIA. "Definition of Data Rate | PCMag." Accessed June 29, 2020. <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/data-rate>.
- Campuzano, Gabriel. "Transferencia." *Tecnológico de monterrey*, July .

- <https://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transfereencia/67/67-III.03.html>.
- Castro-Delgado, Óscar Eduardo, Ingrid Salas-Delgado, Francisco Alfredo Acosta-Argoty, Mario Delgado-Noguera, and José Andrés Calvache. "Muy Bajo y Extremo Bajo Peso Al Nacer." *Pediatría* 49, no. 1 (January 1, 2016): 23–30. <https://doi.org/10.1016/J.RCPE.2016.02.002>.
- Cely, Manuel, Rafael Muñoz, Gustavo Puerto, and Carlos Suárez. "Generación de Señales Para Sistemas de Radio Sobre Fibra Basados En La Combinación Eléctrica de Componentes de Banda Base y Radiofrecuencia." *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 24, no. 3 (2016): 403–11. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77246569005>.
- . "Generación de Señales Para Sistemas de Radio Sobre Fibra Basados En La Combinación Eléctrica de Componentes de Banda Base y Radiofrecuencia." *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 24, no. 3 (July 2016): 403–11. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000300005>.
- Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas., Carlos Mario, Victor Hugo Robles Calvillo, and José Alejo Hernández Blé. *Revista Cubana de Salud Pública. Revista Cubana de Salud Pública*. Vol. 35. Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas, Ministerio de Salud Pública, 1988. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662009000100016.
- CEVAGRAF IMPRENTA. "Cómo Calcular La Resolución de Una Imagen," January 11, 2015. <https://www.cevagraf.coop/blog/calculadora-de-resolucion/>.
- "CODIFICACIÓN DE CANAL PARA EL CONTROL DE ERRORES. - Unefa Curso de Comunicaciones." Accessed May 10, 2020. <https://sites.google.com/site/unefacursodecomunicaciones/codificacin-de-canal-para-el-control-de-errores>.
- Constaín, Sylvia, Iván Antonio, Mantilla Gaviria, Germán Camilo, Rueda Jiménez, Luisa Fernanda Trujillo, Jorge Guillermo, et al. "Plan 5G Colombia El Futuro Digital Es de Todos." Accessed May 18, 2020. https://www.mintic.gov.co/porta/604/articles-118058_plan_5g_2019120.pdf.
- Darvell, B.W., and B.W. Darvell. "Radiography." *Materials Science for Dentistry*, January 1, 2018, 665–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101035-8.50026-2>.
- David, Naranjo. "Llega La Nueva Versión de GNU Radio 3.8.0, La Plataforma de Procesamiento de Señales Digitales." Accessed April 3, 2020. <https://ubunlog.com/llega-la-nueva-version-de-gnu-radio-3-8-0-la-plataforma-de-procesamiento-de-senales-digitales/>.
- Delgado, Victor. "El Método Científico," September 5, 2016. <https://www.alucianante.com/index.php/blog/14-el-metodo-cientifico>.
- Dezube, Rebecca; Hopkins, Johns. "Radiografías de Tórax - Trastornos Del Pulmón y Las Vías Respiratorias - Manual MSD Versión Para Público General," July 2019. <https://www.msdmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-pulmón-y-las-vías-respiratorias/diagnóstico-de-los-trastornos-pulmonares/radiografías-de-tórax>.
- Dinamarca Ossa, José. "Análisis de Diagramas de Ojo," November 6, 2002.

- <https://docplayer.es/2638743-Analisis-de-diagramas-de-ojo.html>.
- Édgar Rodríguez, Carlos. "Telesalud En Colombia." Accessed May 21, 2020. [http://www.acreditacionensalud.org.co/Adm/ArchivosBoletines/68/Revista Normas y Calidad N° 90.pdf](http://www.acreditacionensalud.org.co/Adm/ArchivosBoletines/68/Revista%20Normas%20y%20Calidad%20N%2090.pdf).
- Editorial Definición MX. "Resultados Para Bit.," February 12, 2015. <https://definicion.mx/?s=Bit>.
- Escallón-Portilla, Andrés Felipe, and Víctor Hugo Ruiz-Guachetá. "Evaluación Del Desempeño Físico de Un Sistema FTTH-GPON Para Servicios Quad Play Después de La Incorporación de Un Módulo RoF." *TecnoLógicas* 23, no. 47 (January 30, 2020): 23–61. <https://doi.org/10.22430/22565337.1391>.
- Fàbrega, Josep Maria. "Sistemas Ópticos de Transmisión." Accessed June 30, 2020. [http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/76208/5/Sistemas de comunicación ópticos_Módulo 3_Sistemas ópticos de transmisión.pdf](http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/76208/5/Sistemas%20de%20comunicaci3n%203_Sistemas%2033pticos%20de%20transmisi3n.pdf).
- Fahmey, Sameh S., Hassan Fathy, Khadiga Abo Gabal, and Howida Khairy. "Cardiac Troponin T in Neonates with Respiratory Distress." *Egyptian Pediatric Association Gazette* 66, no. 4 (December 1, 2018): 100–102. <https://doi.org/10.1016/J.EPAG.2018.09.004>.
- Fernández, Andrés; Carnicero, Javier. "Manual de Salud Electrónica," January 2012. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3023/1/S2012060_es.pdf.
- Fernández, Andrés. "Salud-e: Promesas y Desafíos Para La Inclusión Social," July 12, 2010. <https://www.cepal.org/cgi-bin/getprod.asp?xml=/socinfo/noticias/paginas/9/40689/P40689.xml&xsl=/socinfo/tpl/p18f.xsl&base=/socinfo/tpl/top-bottom.xsl>.
- "Formatos de Modulación Para Altos Regímenes Binarios 3.1.-Introducción." Accessed May 23, 2020. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/40055/fichero/Volumen+1%252F07+-+Capitulo+3+-+Formatos+de+modulacion+para+altos+regimenes+binarios.pdf>.
- Ganney, Paul S., Sandhya Pisharody, and Edwin Claridge. "Software Engineering." *Clinical Engineering*, January 1, 2014, 133–70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396961-3.00009-3>.
- García, Alvin, Juan Felipe Isaza, Ing Mec, Uriel Zapata, Ing Civ, and Samuel Roldán. "Ejecución de Un Sistema Piloto de Tele-Radiología En Medellín, Colombia." *Colomb Med.* Vol. 37, 2006. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/5516>.
- . "Ejecución de Un Sistema Piloto de Tele-Radiología En Medellín, Colombia." *Colomb Med.* Vol. 37, September 20, 2006. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/5516>.
- Geronimo; Cesar. "Libro de Comunicaciones Opticas by Cesar Geronimo - Issuu." Accessed May 18, 2020. https://issuu.com/cesargeronomo2/docs/libro_de_comunicaciones_opticas.
- Ghafoor, Salman. "(PDF) Radio over Fiber Systems," June 2012. https://www.researchgate.net/publication/299463915_Radio_over_fiber_syste

- ms.
 Glosario informático. “Diccionario de Términos Informáticos,” 2007. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Glosario_Informático.pdf
- gonzalez; rocio. “¡Formatos Gráficos Para Imágenes! Ventajas y Desventajas - Baética.” Accessed May 16, 2020. <https://baetica.es/formatos-graficos-imagenes/>.
- Granada Torres, Jhon James, Claudia Milena Serpa Imbett, Gloria Margarita Varón Durán, and Neil Guerrero González. *Ingeniería y Desarrollo. Ingeniería y Desarrollo*. Vol. 29. Fundacion Universidad del Norte, 2011. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-34612011000200007&lng=en&nrm=iso.
- Guzmán, Carlos; Vega, Denys. “Sistema Para El Almacenamiento y Transmisión de Imágenes Médicas, Versión 3.0,” June 2014. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18592014000100003.
- Hosseini, Masoud. “Syntactic Interoperability and the Role of Standards.” *Health Information Exchange*, January 1, 2016, 123–36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803135-3.00008-6>.
- Indrajit, I. K.; Verma, B. S. “Digital Imaging in Radiology Practice: An Introduction to Few Fundamental Concepts.” 2007. <https://doi.org/10.4103/0971-3026.36866>.
- Ingeniería, real academia de. “Tasa de Error | Real Academia de Ingeniería.” Accessed May 21, 2020. <http://diccionario.raing.es/es/lema/tasa-de-error>.
- Jimenez, P. “TÉCNICAS DE MODULACIÓN ÓPTICA CON DISPOSITIVOS ELECTRO-OPTICOS.” Accessed June 30, 2020. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/jimenez_p_jl/capitulo4.pdf.
- Láser, Del, Alumno: Javier, and Esténoz Valenzuela. “ESTUDIO SOBRE LAS APLICACIONES INDUSTRIALES PROYECTO FIN DE CARRERA,” March 2011. <http://zagan.unizar.es/record/5646/files/TAZ-PFC-2011-098.pdf>.
- Lerín, Alfonso. “Modulación Directa de Diodos Láser de Alta Velocidad Para Sistemas de Transmisión Coherente.” Barcelona. Accessed June 3, 2020. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17332/Proyecto_Final_de_Carrera.pdf?sequence=4&isAllowed=y.
- “Ley 1419 de 2010 - EVA - Función Pública,” December 13, 2010. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40937>.
- Lim, C., A. Nirmalathas, D. Novak, R.S. Tucker, and R.B. Waterhouse. “Technique for Increasing Optical Spectral Efficiency in Millimetre-Wave WDM Fibre-Radio.” *Electronics Letters* 37, no. 16 (2001): 1043. <https://doi.org/10.1049/el:20010676>.
- Liu, Xiang. “Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era,” 2010. https://www.researchgate.net/publication/337353783_Evolution_of_Fiber-Optic_Transmission_and_Networking_Towards_the_5G_Era.
- . “Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era.”

- IScience*. Elsevier Inc., December 20, 2019. https://www.researchgate.net/publication/337353783_Evolution_of_Fiber-Optic_Transmission_and_Networking_Towards_the_5G_Era.
- Maglogiannis, Ilias, Christos Andrikos, Georgios Rassias, and Panayiotis Tsanakas. "A DICOM Based Collaborative Platform for Real-Time Medical Teleconsultation on Medical Images," 79–91, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57348-9_7.
- Maki, Dra, and Esther Ortiz Domínguez. "DR. JOSÉ ÁNGEL CÓRDOVA VILLALOBOS SUBSECRETARIA DE INNOVACIÓN Y CALIDAD DIRECTORA GENERAL DEL CENTRO NACIONAL DE EXCELENCIA TECNOLÓGICA EN SALUD." Accessed May 20, 2020. http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/biomedica/guias_tecnologicas/41_gt_PACS.pdf.
- martinez velandia, laura. "PROPUESTA PARA MONTAJE DE LABORATORIO DE TELESALUD Y TELEMEDICINA LAURA MARTINEZ VELANDIA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DE INGENIERIA PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA ELECTRONICA." Bogotá, 2018. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7983/1/MartínezVelandiaLaura2018.pdf>.
- MathWorks. "OptiSystem - Software de Diseño de Sistemas de Comunicación Óptica - Productos y Servicios de Terceros - MATLAB y Simulink." Accessed April 20, 2020. https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/optisystem.html.
- Mercedes Alicia, Tilleria Cabrera. "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES APLICADAS A LA MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN DIGITAL A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA MATLAB/SIMULINK." quito, November 2016. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16886/1/CD-7465.pdf>.
- Nader, Karim. "Qué Es La Telemedicina," 2011. <http://www.elhospital.com/temas/Que-es-la-telemedicina+8082249>.
- NIH. "Definición de Telemedicina - Diccionario de Cáncer - National Cancer Institute." Accessed May 21, 2020. <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/telemedicina>.
- Nirmalathas, Ampalavanapillai, Christina Lim, Dalma Novak, Ka-Lun Lee, Masduzzaman Bakaul, Prasanna Gamage, Rod Waterhouse, and Yizhuo Yang. "Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies." *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, Issue 4, Pp. 390-405 28, no. 4 (February 15, 2010): 390–405. <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-28-4-390>.
- Noreña, Tatiana, and Eduardo Romero. "Compresión de Imágenes Médicas." *Biomedica* 33, no. 1 (March 1, 2013): 137–51. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v33i1.804>.
- optiwave. "OptiSystem Overview." Accessed April 20, 2020.

- <https://optiwave.com/optisystem-overview/>.
- Optiwave. "How To Set Up An NRZ Pulse Generator In OptiSystem." Accessed May 18, 2020. <https://optiwave.com/products/system-and-amplifier-design/optisystem/optisystem-videos/optisystem-training-videos/how-to-set-up-an-nrz-pulse-generator-in-optisystem/>.
- Organización mundial de la salud. "Reducir La Mortalidad de Los Recién Nacidos," September 19, 2019. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/newborns-reducing-mortality>.
- Ovalle, Alfredo, Elena Kakarieka, Gustavo Rencoret, Ariel Fuentes, María José del Río, Carla Morong, and Pablo Benítez. "Factores Asociados Con El Parto Prematuro Entre 22 y 34 Semanas En Un Hospital Público de Santiago." *Revista Médica de Chile* 140, no. 1 (January 2012): 19–29. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872012000100003>.
- Pardellans, Joaquim; Carreño, Joan; Lucaya, Javier. "Sistemas de Archivo y Comunicación de Imagen En Radiología," 1994. <http://www.pediatricrad.info/wo/textes/pacsteor.htm>.
- Patiño, Linda. "¿Qué Significa Que Colombia Tenga Su Primera Red 5G? - Novedades Tecnología - Tecnología - ELTIEMPO.COM," May 11, 2020. <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/que-significa-que-colombia-tenga-su-primera-red-5g-494254>.
- Pinar Domínguez, Iván; Fuentes Murillo, Juan. "Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida Por Software," 2011. <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/LibroSDRV7USv8.pdf>.
- Platea. "Imagen Digital: Conceptos Básicos." Accessed April 17, 2020. <http://platea.pntic.mec.es/~lgonzale/tic/imagen/conceptos.html>.
- Preim, Bernhard, Charl Botha, Bernhard Preim, and Charl Botha. "An Introduction to Medical Visualization in Clinical Practice." *Visual Computing for Medicine*, January 1, 2014, 69–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415873-3.00003-1>.
- Prieto, Ronald Alexander; Rojas, Leonardo Rafael. "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CQAM SOBRE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE," May 18, 2017. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5834>.
- RAE - ASALE. "Fibra | Definición | Diccionario de La Lengua Española | RAE - ASALE." Accessed June 29, 2020. <https://dle.rae.es/fibra?m=form#4kv82fY>.
- . "Patología | Definición | Diccionario de La Lengua Española | RAE - ASALE." Accessed May 21, 2020. <https://dle.rae.es/patología?m=form>.
- Rastreator. "Conexiones Simétricas," October 28, 2014. <https://www.rastreator.com/telefonía/articulos-destacados/conexiones-simetricas.aspx>.
- Rico-Martínez, Mónica Andrea, Álvaro Morales-Vicente, Rafael Puerta-Ramírez, Víctor Mehmeri-Dantas, Idelfonso Tafur-Monroy, and Gloria Margarita Varón-Duran. "Latency Analysis on W-Band Hybrid Fiber-Wireless Link Using Software Defined Radio in Real Time." *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 87 (June 2018): 16–22. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n87a03>.

- Rodríguez, Emanuel; “Introducción a La Imagen Digital En Radiología - Imagenología,” June 26, 2014. <https://imagenologia.robustiana.com/20-introduccion-a-la-imagen-digital-en-radiologia>.
- Rodríguez Torres, Alejandra, Edgar C. Jarillo Soto, and Donovan Casas Patiño. “Medical Consultation, Time and Duration.” *Medwave* 18, no. 5 (September 26, 2018): e7266. <https://doi.org/10.5867/medwave.2018.05.7264>.
- Rohde, Schwarz. “Formas de Onda 5G .” Accessed May 7, 2020. https://www.rohde-schwarz.com/es/soluciones/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/formas-de-onda-5g/formas-de-onda-5g_230224.html?rusprivacypolicy=0.
- Rojas, David, José Alburquerque, Julia Bermejo, Óscar Blanco, Javier Carnicero, Fernando Escolar, Andrés Fernández, et al. “Manual de Salud Electrónica Para Directivos de Servicios y Sistemas de Salud.” Accessed June 3, 2020. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3023/1/S2012060_es.pdf.
- Sacie Alcázar, David. “Simulación de Sistemas CO-OFDM 4D Ópticos.” Accessed June 30, 2020. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40579/6/dsaciealTFM0115memoria.pdf>.
- TELECOMUNICACIONES Director, Magister EN, and José Giovanni López Perafán. “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA FTTH-GPON PARA SERVICIOS QUAD PLAY AL INTEGRAR UN MÓDULO RoF ANEXOS ANDRÉS FELIPE ESCALLÓN PORTILLA. VÍCTOR HUGO RUIZ GUACHETÁ. Trabajo de Grado Para Optar Al Título De,” 2018. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1321/Ane-xos.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- Teledet. “La Resolución Espacial.” Accessed May 21, 2020. <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-espacial.htm>.
- Tom Rondeau. “Re: [Discuss-Gnuradio] What Do Packet Encoder and Packet Decoder Do?,” July 30, 2014. <https://lists.gnu.org/archive/html/discuss-gnuradio/2014-07/msg00535.html>.
- Torres-Muñoz, Javier, Christian Rojas, Diana Mendoza-Urbano, Darly Marín-Cuero, Sandra Orobio, Carlos Echandía, Javier Torres-Muñoz, et al. “Risk Factors Associated with the Development of Perinatal Asphyxia in Neonates at Hospital Universitario Del Valle, Cali, Colombia, 2010-2011.” *Biomédica* 37 (October 31, 2016): 51–56. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v37i1.2844>.
- Torres, Jhon James Granada; Serpa Imbett, Claudia Milena Serpa; Durán, Gloria Margarita; Varón González, Neil Guerrero. “Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band,” 2011. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612011000200007&lang=es.
- Viveros, Eгна: Moncalenano, John. “PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE LA POLÍTICA PÚBLICA LEY 1419 DE TELESALUD COMO FACTOR DE

INCLUSIÓN SOCIAL EN EL CORREGIMIENTO NÚMERO TRES ZONA RURAL DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA.” universidad icesi , 2016. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/80089/1/T00468.pdf.

Wake, D., M. Webster, G. Wimpenny, K. Beacham, and L. Crawford. “Radio over Fiber for Mobile Communications.” In *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics - Technical Digest, MWP*, 157–60, 2004. <https://doi.org/10.1109/mwp.2004.1396863>.

Wenceslao, Frank; Labarrere Cruz, Yureisy; González Hernández, Gretel; Barrios Rentería, Yamilé. “Factores de Riesgo Del Síndrome Dificultad Respiratoria de Origen Pulmonar En El Recién Nacido,” July 20, 2007. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03192007000300005&lang=es#cargo.











Yanira, Andrea, Rodríguez Elaboración, Astrid Berena, and Herrera López. “Análisis de Situación de Salud (ASIS) Colombia,2018,” 2018. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/asis-colombia-2018.pdf>.

Zapardiel Prieto, Jaime. “DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO MEDIANTE FIBRA ÓPTICA,” June 2014. http://oa.upm.es/33869/1/PFC_jaime_prieto_zapardiel.pdf.

ANEXOS











Anexo A. Estudio de vigilancia tecnológica (Ver archivo anexo)

Anexo B. Tamaño de imágenes transmitidas, con un data rate de 20Mbps

Nombre	Tamaño	Lugar original
 1	932,2 kB	Imágenes
 2	942,1 kB	Imágenes
 3	974,8 kB	Imágenes
 4	966,7 kB	Imágenes
 5	966,7 kB	Imágenes
 6	913,4 kB	Imágenes
 7	987,1 kB	Imágenes
 8	983,0 kB	Imágenes
 9	970,8 kB	Imágenes
 10	970,8 kB	Imágenes











Fuente: autor

Anexo C. Tamaño de imágenes transmitidas, con un data rate de 200Mbps

Nombre	Tamaño	Tipo ▾
 11	14,8 MB	Imagen
 12	14,8 MB	Imagen
 13	14,5 MB	Imagen
 14	14,9 MB	Imagen
 15	14,8 MB	Imagen
 16	14,9 MB	Imagen
 17	14,6 MB	Imagen
 18	14,6 MB	Imagen
 19	14,7 MB	Imagen
 20	14,9 MB	Imagen

Fuente: autor

Anexo D. Tamaño de imágenes transmitidas, con un data rate de 2Gbps

Nombre	Tamaño	Tipo
 31	123,1 MB	Imagen
 32	124,1 MB	Imagen
 33	123,3 MB	Imagen
 34	123,5 MB	Imagen
 35	123,1 MB	Imagen
 36	123,7 MB	Imagen
 37	123,1 MB	Imagen
 40	122,1 MB	Imagen
 38	124,1 MB	Imagen
 39	123,7 MB	Imagen

Fuente: autor