

Sistemas de radio sobre fibra y redes 5G: perspectiva y aplicaciones

Radio over Fiber (RoF) Systems and 5G networks: Perspective and applications

Valentina Peñaranda Villalba¹
Karla Cecilia Puerto López²
Jhon Jairo Ramírez Mateus³

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.33.9732>

RESUMEN

Este documento presenta una investigación exhaustiva de los avances que han tenido los sistemas de radio sobre fibra en el ámbito mundial en los últimos años, conociendo de una mejor manera sus aplicaciones y generalidades. Esta revisión también contiene información sobre los diseños de un sistema de comunicación óptico, redes 5G, entre otros. Adicionalmente, estos sistemas de radio han tenido un gran impacto en la actualidad a causa de sus múltiples beneficios, ya que cuentan con una atenuación de 0,2 dB/km. Finalmente, este artículo permite observar la necesidad de cubrir las líneas de investigación referentes a esta temática, para estar a la vanguardia en la evolución tecnológica del mundo.

Palabras claves: radio sobre fibra, redes 5G, aplicaciones.

ABSTRACT

This document presents an exhaustive investigation of the advances that Radio over Fiber Systems have had worldwide in recent years, knowing in a better way the applications and generalities of said systems. Likewise, this review also contains information about the designs of an optical communication system, 5G networks, among others. Additionally, Radio over Fiber systems have had a great impact today due to their multiple benefits, since they have an attenuation of 0.2 dB/km. Finally, this article allows us to observe the need to cover the lines of research related to this subject, in order to be at the forefront of the world's technological evolution.

Keywords: Radio over Fiber, 5G networks, applications.



Cómo citar este artículo: V. Peñaranda Villalba, K. Puerto López and J. Ramírez Mateus. "Sistemas de radio sobre fibra y redes 5G: perspectiva y aplicaciones". *Ingeniare*, vol. 19, no. 33, pp. 73-88, Diciembre 2022.

¹ Ingeniera electrónica de la Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada y Control, San José de Cúcuta, Colombia. valentinapv@ufps.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8202-5372>

² Candidata a Doctora en Educación, M.Sc. Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada y Control, San José de Cúcuta, Colombia. karlaceciliapl@ufps.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3749-676X>

³ Ingeniero electrónico de la Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada y Control, San José de Cúcuta, Colombia. jhonjaiorm@ufps.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-6147>

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la tecnología ha desempeñado un papel relevante en el mundo de las telecomunicaciones, evidenciando un crecimiento exponencial en el número de usuarios, dispositivos móviles y conexiones de internet. La cantidad de dispositivos conectados a redes será más del triple de la población para el 2023; adicionalmente, más del 70% de la población mundial tendrá conectividad móvil [1].

No obstante, el tráfico de las redes ha aumentado y los usuarios demandan una conexión inalámbrica permanente. Por esta razón, este avance exige una infraestructura que cuente con un ancho de banda amplio, una latencia mínima y una alta velocidad de transmisión. Por consiguiente, un sistema de Radio sobre Fibra (RoF) puede allanar el camino para posibles soluciones para redes 5G, prometiendo una alternativa capaz de suplir tal demanda.

Radio sobre Fibra es una tecnología mediante la cual la luz se modula por medio de una señal de radiofrecuencia y se transmite a través de un enlace de fibra óptica, enviando señales de radio desde una central remota, lo cual permite centralizar las funciones de procesamiento de la señal de radiofrecuencia en una ubicación compartida, ofreciendo pocas pérdidas de la señal. Estos sistemas surgen para incrementar las redes de telecomunicaciones, logrando grandes ventajas como menores pérdidas de transmisión y una menor sensibilidad al ruido, además de que responde a las necesidades del ancho de banda y al aumento de la flexibilidad operacional [2].

En este trabajo de investigación se hace una revisión detallada de los estudios que se han realizado acerca de los diseños de sistemas de comunicaciones óptico, Radio sobre Fibra, redes 5G, entre otros. Examinando y analizando los avances que han tenido los sistemas de RoF con el tiempo, por medio de bases de datos y repositorios de diversas universidades. Igualmente, se tuvieron en cuenta los ámbitos regional (Norte de Santander), nacional e internacional.

En el 2020, la Universidad de Paris-Est estudió el desempeño de la tecnología de Radio sobre Fibra para la transmisión de formas de ondas 5G, determinando los rangos de funcionamiento óptimos [3]. En ese mismo año, en Colombia la Universidad de Antioquia caracterizó un sistema de red híbrido de Radio sobre Fibra, operando en las frecuencias 60, 75 y 82 GHz, siendo la de 60 GHz banda de uso libre y las de 75 y 82 GHz bandas para las redes 5G. Se determinó la viabilidad del modelo y su alcance, implementando técnicas de *Machine Learning* que mejoraron el desempeño de la red [4]. De igual manera, en el 2016, en Cúcuta describieron una simulación de un sistema RoF utilizando multiplexación WDM a través del *software* Matlab, el cual tuvo como objetivo modelar y simular un sistema de Radio sobre Fibra para evaluar las degradaciones producidas por la dispersión que afectan la señal en la transmisión de información [5].

En conclusión, Radio sobre Fibra es una tecnología innovadora que se destaca por sus ventajas, como su gran ancho de banda y su velocidad de transmisión (10 Gbps). Esto ha despertado el interés en muchos países en cuanto a la investigación y el desarrollo de estos sistemas.

2. METODOLOGÍA

Este documento revisa información sobre temas como diseños de un sistema de comunicación óptico, Radio sobre Fibra, redes 5G, entre otros, los cuales se seleccionaron utilizando bases de datos como IEEE Xplore, Scopus, ACM, ResearchGate y Google Académico. Así como algunos repositorios de diversas universidades. Los documentos elegidos tiene una fecha superior o igual al año 2015, ofreciendo información reciente. Seguidamente, se hizo una revisión exhaustiva de cada investigación, determinando los resultados, conclusiones y recomendaciones más relevantes. En la Figura 1 se muestra el desarrollo de la investigación.

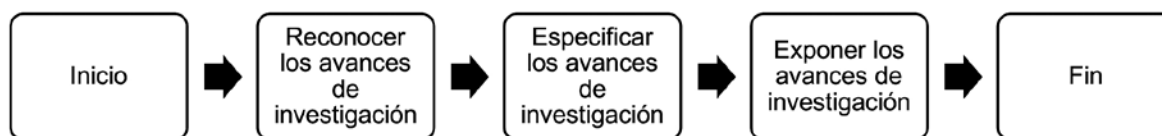


Figura 1. Metodología usada en el proyecto

Fuente: Elaboración por los autores.

3. Resultados y discusión

Los sistemas RoF tienen gran impacto en la actualidad por sus múltiples beneficios, ya que cuentan con un mejor ancho de banda y poca atenuación, que puede ser de 0,2 dB/km. A continuación, se presenta el desarrollo de los sistemas RoF en redes 5G desde los panoramas regional, nacional e internacional.

3.1 Panorama internacional

La revista de tecnología *Lightwave* publicó un artículo denominado “Sistema de Radio sobre Fibra de 25Gb/s OFDM de 60 GHz basado en un láser de ganancia conmutada”, en el que los autores demuestran un sistema de transmisión que emplea un láser DFB de ganancia conmutada para la generación de ondas milimétricas [6]. Por su parte, la Universidad Autónoma de Madrid realizó un proyecto en el que se desarrolló un sistema de comunicaciones digitales de banda base, realizando modificaciones oportunas para implementar una modulación sobre una portadora de radiofrecuencia de la señal transmitida, al que denominó Radio sobre Fibra. Además, en este estudio se evaluó el impacto de la señal en parámetros como la atenuación, la distorsión y la transmisión de varios canales, simultáneamente [7].

En esa misma línea, en Reino Unido, Varghesey otros [8] llevaron a cabo una descripción general rudimentaria de la arquitectura RoF, elaborando técnicas diseñadas para mejorar el rendimiento alcanzable del sistema. Finalmente, se describieron las técnicas para reducir los costos de instalación de los sistemas Radio sobre Fibra.

En el artículo “Tecnologías de Radio sobre Fibra para sistemas inalámbricos emergentes” se analiza la tecnología de Radio sobre Fibra que puede soportar la distribución de señales inalámbricas de banda ancha en una red óptica/inalámbrica convergente, también se describen algunos desafíos para la aplicación exitosa de tecnologías de Radio sobre Fibra en los futuros sistemas inalámbricos, como las redes 5G y 60 GHz [9].

Desde otra perspectiva, la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional efectuó un proyecto en el que se aborda el diseño de material didáctico, orientado a la implementación de un laboratorio de comunicaciones ópticas con base en el uso de herramientas computacionales de simulación como Matlab, en combinación con el Communication System Toolbox y el paquete de simulación OptiSystem [10]. Así mismo, en el 2016 Kabalan [11]. realizó una tesis doctoral en la que se estudian y simulan enlaces RoF utilizando circuitos eléctricos equivalentes de componentes fotónicos. Esta investigación se destinó a aplicaciones inalámbricas de alto ancho de banda (60 GHz), permitiendo una tasa de transmisión muy alta.

La *Revista Fotónica* de IEEE publicó un artículo presentando un sistema de transporte híbrido de fibra hasta el hogar (FTTH) y Radio sobre Fibra (RoF) para transmitir una señal cableada y dos señales inalámbricas, simultáneamente, a través de una onda de luz óptica. Los resultados demostraron que las señales FTTH independientes y RoF de dos bandas se pueden generar y separar mediante dispositivos de radiofrecuencia, de frecuencia relativamente baja, moduladores ópticos y divisores de haz de polarización [12].

Un año más tarde, en Malasia se presentó un artículo sobre el formato de modulación utilizado para producir los pulsos ópticos, que son de retorno a cero (RZ) y no retorno a cero (NRZ). Adicionalmente, evalúa el rendimiento de la tasa de error de bits para el sistema OCDMA-RoF, lo cual se considera un método prometedor para mejorar la eficiencia espectral [13].

En otra investigación para la revista de tecnología *Lightwave*, titulada “Investigaciones de Fronthaul de Radio sobre Fibra analógica de 60 GHz”, examinaron dos esquemas para generar señales de ondas milimétricas de 60,25 GHz basados en una variación de las técnicas de modulación de banda lateral única óptica (OSSB) y portadora suprimida de banda lateral doble óptica (DSB-SC). También se desarrollaron y verificaron modelos analíticos de Fronthaul analógicos propuestos, logrando una buena concordancia entre los resultados experimentales y analíticos [14].

En el 2017 los investigadores Browningy otros [15] realizaron una transmisión analógica de Radio sobre Fibra de cinco bandas de UF-OFDM, con heterodinamismo óptico de alrededor de 60 GHz. Los autores lograron un rendimiento muy por debajo del límite de corrección de errores hacia adelante para un bit sin procesar agregado y destacaron la importancia de la correlación de fase óptica precisa en estos sistemas con respecto a los requisitos futuros de los sistemas 5G. En ese mismo año, la universidad Ghent describió una comparación experimental entre Radio sobre Fibra Analógica (ARoF) y Radio sobre Fibra modulada Sigma Delta (SDoF). Los experimentos se llevaron a cabo utilizando una constelación 16-QAM con una velocidad en baudios de 20 a 125 MBd, modulada en una frecuencia portadora central de 1 GHz [16].

En España, Morte Palacios [17] diseñó y caracterizó mezcladores pasivos en una tecnología CMOS para aplicaciones de Radio sobre Fibra (RoF) en redes de área doméstica. El proyecto constó de tres fases: en la primera hizo una revisión bibliográfica de los mezcladores pasivos y filtros polifase, posteriormente se centró en el desarrollo de los mezcladores I-Q y en la última fase realizó el diseño físico, aplicando las técnicas de diseño apropiadas.

El Grupo de Comunicaciones Móviles de Zaragoza, España, propuso la linealización de un sistema RoF de doble banda mediante predistorsión digital. Los resultados fueron evaluados experimentalmente con señales LTE en un sistema RoF, obteniendo de esta forma mejores resultados que con el predistorsionador clásico de una banda [18]. Otro investigador español desarrolló un proyecto de grado titulado "Linealización mediante predistorsión digital en un enlace de Radio sobre Fibra con rama de realimentación", en el que aplicó las técnicas de linealización en un sistema de transmisión híbrido. Para esto, se estudiaron, caracterizaron y evaluaron los efectos degradantes que se producen en estos sistemas, tanto en la parte óptica como en la de radiofrecuencia [19].

En Japón se efectuó una revisión sobre sistemas de ondas milimétricas y terahercios de Radio sobre Fibra para futuras redes móviles. Se concluyó que el uso de tecnología fotónica para la generación, transmisión y conversión ascendente de señales puede ayudar a realizar sistemas inalámbricos de fibra sin costuras simples, de baja latencia, alta capacidad y alto rendimiento [20].

En otro estudio, Cepeda y otros [21] first we present an introduction of the main concepts about radio over fiber and an orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM presentaron la implementación de un sistema de Radio sobre Fibra OFDM a 2,5 GHz utilizando radio definida por *software* (SDR). Compararon un sistema RoF OFDM en tres escenarios diferentes, modificando las distancias inalámbricas y la distancia de la fibra con el fin de evaluar su rendimiento .

En el 2018, en la *Revista de Microondas, Optoelectrónica y Aplicaciones Electromagnéticas* se expuso un artículo en el que se propuso y evaluó una red fronthaul WDM-PON bidireccional incoloro que

transporta señales analógicas de Radio sobre Fibra como una alternativa. Los resultados experimentales muestran una transmisión exitosa bidireccional en las bandas inalámbricas de 1,25, 2,5 y 5 GHz con velocidades de datos de 155, 622 y 1250 Mbps [22].

Por su parte, Dixit [23] diseñó una red flexible de Radio sobre Fibra (RoF) para redes de telecomunicaciones de próxima generación, estudiando los enlaces RoF y descubriendo que las técnicas de modulación de subportadoras de última generación son adecuadas para lograr un balance de enlace de 20 a 45 km. Así mismo, propuso un nuevo algoritmo que se conoce como MIP, demostrando que una red RoF, un mecanismo de sondeo híbrido entre MIP y sondeo simple dependiendo del área de la celda es el más óptimo.

En el 2018, el instituto de Tecnología Rajiv Gandhi propuso mejorar el rendimiento de un enlace bidireccional de Radio sobre Fibra mediante el uso de red de Bragg de Fibra, en una reutilización de longitud de onda basada en modulación de banda lateral doble suprimida por portadora, que incorpora una unidad de procesamiento de señal y detección coherente como DSP [24].

En el Instituto Nacional de Tecnología de Malaviya (India) realizaron una tesis denominada “Modelado y simulación de esquema OFDM usando QAM para Radio sobre Fibra”, en la que utilizaron las técnicas de modulación de amplitud de cuadratura (QAM) y multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), proponiendo un modelo de sistema RoF-OFDM, usando la longitud de fibra óptica hasta 10 km [25].

De la misma forma, en Chipre, el Laboratorio de Investigación de Fotónica de Microondas, expone un concepto basado en fibra multinúcleo (MCF), utilizado simultáneamente para generar señales de ondas milimétricas (mm-wave), en el que se empleó un enlace de Radio sobre Fibra para proporcionar alta capacidad y una baja latencia [26]. En ese mismo año, la Universidad Nacional y Kapodistrian de Atenas publicaron el artículo “Compensación de sesgo estático en sistemas de radio multinúcleo sobre fibra para formación de haces de ondas de 5G Mm”, en el cual plantean un método eficiente para compensar los retrasos diferenciales, sin una ecualización completa de las longitudes de ruta de transmisión, reduciendo la pérdida de potencia y la complejidad [27].

En el 2019, en España, Salueña [28] caracterizó y modeló una superficie de cavidad vertical (VCSEL) para el diseño de un láser driver con elevada linealidad para aplicaciones Radio sobre Fibra con tecnología CMOS. El proyecto constó de diversas fases: el estudio teórico, la caracterización experimental y la comprobación de la estructura ecualizadora elegida.

En la revista de tecnología *Lightwave* se puede observar el desarrollo que ha tenido la tecnología de Radio sobre Fibra en los últimos años. Esta publicación describe la evolución y los múltiples desafíos técnicos en torno al costo de implementación, la interoperabilidad y la compatibilidad [29].

En Corea del Sur se diseñó una red móvil 5G para interiores, basada en ondas milimétricas 4x4, logrando un rendimiento total de 4Gb/s, comprobando experimentalmente el sistema de antena distribuida (DAS) basado en Radio sobre Fibra. La medición del rendimiento estaba limitada por la unidad móvil 5G; por lo tanto, podría mejorarse aún más si se explotan unidades móviles de mayor velocidad [30].

De vuelta en la India, Singh y Kumar [31] evaluaron la comparación experimental de varias técnicas de Fiber Bragg Grating, utilizando fibras de dispersión compensada para la arquitectura híbrida GPON-RoF, concluyendo que para satisfacer las demandas de un número creciente de usuarios se requiere una arquitectura híbrida móvil y fija. En otra investigación, denominada "Implementación de Radio sobre Fibra (RoF) usando MZM para comunicación de larga distancia", se discutieron importantes cuestiones de diseño y se presentó un ejemplo de enlace para un sistema inalámbrico, empleando la modulación PAM RZ a la señal aleatoria de radiofrecuencia [32].

En el 2019 se hizo una revisión detallada en la que demuestran la tecnología de Radio sobre Fibra perfecta para la futura generación de sistemas de comunicación con menor atenuación, mayor ancho de banda e inmunidad a interferencias electromagnéticas con gran área de cobertura. Así mismo, se discutieron en detalle las diversas técnicas de multiplexación y modulación para mejorar su rendimiento [33].

En la misma revista de tecnología *Lightwave* se demostró el primer transmisor digital de Radio sobre Fibra Sigma-Delta en tiempo real en la banda de 22,75 – 27,5 GHz, sin la ayuda de conversión ascendente analógica/óptica o duplicación de la frecuencia portadora habilitada por un 100-GS/s de baja latencia del moduladora sigma-delta [34].

En la Universidad de Paris-Est, en el 2020, se presentó una tesis doctoral en la cual se estudió el desempeño de la tecnología de Radio sobre Fibra para la transmisión de formas de onda 5G sobre enlaces entre estaciones base y unidades remotas que brindan cobertura de radio a los usuarios móviles, permitiendo determinar los rangos de funcionamiento óptimos del sistema vinculados a la elección de componentes y parámetros de transmisión [3].

Por su parte, en la *Revista Internacional de Ingeniería Eléctrica e Informática* Tan Tran y Trung Bui [35] four-wave mixing nonlinearity (FWM) presentaron un modelo mejorado de sistemas de comunicación RoF, utilizando la técnica de multiplexación por subportadora/multiplexación por división de longitud de onda (SCM/WDM). Los resultados de las simulaciones confirmaron que se podría obtener la menor tasa de errores de bits usando la modulación óptica de banda lateral única (OSSB) en las frecuencias 193.1 THz, 193.2 THz, 193.35 THz y 193.6 THz. En la investigación denominada "Radio sobre Fibra: una tecnología de red de banda ancha alternativa para IoT" se proyecta un estudio de dos estrategias de Radio sobre Fibra, en el que ambas tienen un rendimiento excelente e incluso ofrecen la posibilidad de extender la cobertura del área inalámbrica donde las redes móviles no llegan o la red 802.11 presenta

problemas. La Radiofrecuencia sobre Fibra (RFoF) y la Frecuencia Intermedia sobre Fibra (IFoF) son dos estrategias de transmisión compatibles con los nuevos servicios de banda ancha [36].

De igual forma, en el 2020, en Indonesia lanzaron un programa para la transición de los sistemas de televisión analógica a digital (DTV) para mejorar la eficiencia y la calidad de las señales; sin embargo, la infraestructura fue desafiada por la topografía única y la distribución de la población del país. Por esta razón, se analizan dos esquemas de distribución de Radio sobre Fibra (RoF), que son Fibra a la Torre y Fibra al Hogar, como candidatos para resolver este problema. Este análisis se consideró para siete regiones de Indonesia. Finalmente, se recomiendan diferentes esquemas para cada región, basados en consideraciones de pérdida de enlace a lo largo de todas las rutas [37]. En ese mismo año, en Australia, Lim y Nirmalathas [38] expusieron los sistemas de Radio sobre Fibra como una tecnología híbrida que se introdujo por primera vez en el campo de las telecomunicaciones en los años ochenta. Esa investigación tuvo como objetivo proporcionar una descripción general de las áreas de investigación actuales en RoF, discutiendo los desafíos y las perspectivas de futuro en este campo de estudio.

En el 2021, Li y otros [39] this imposes high demands on the radio access networks (RANs publicaron el artículo “Procesamiento de Señal MIMO de dominio óptico asistido por Radio sobre Fibra Analógico para redes de acceso de radio de alto rendimiento y bajo costo”, en el que proponen un concepto de RAN asistido por Radio sobre Fibra rentable, pero de alto rendimiento. La señal MIMO se transporta por la fibra y se procesa ópticamente en una unidad central, demostrando que el diseño ARoF es capaz de reducir el costo total de RAN.

Finalmente, en Ecuador se hizo una evaluación del sistema de RoF utilizando diferentes esquemas de modulación digital convencionales e híbridos a través del *software* de simulación OptiSystem 7.0, comparando las métricas de factor Q, la tasa de error de bits (BER) y la potencia recibida (Rx) [40].

3.2 Panorama nacional

En Colombia, la Revista *Ingeniería, Investigación y Tecnología* publicó un artículo acerca de un estudio comparativo de técnicas de generación de señales para el transporte de información en sistemas de Radio sobre Fibra usando técnicas de combinación óptica. El estudio se basó en tres técnicas de generación: brazo doble, generación en paralelo y generación serial. Los resultados muestran que los índices de modulación para los esquemas de brazo doble y serial presentan una dependencia entre sí, mientras que la configuración de generación en paralelo tiene una mayor flexibilidad en el establecimiento de los índices de modulación [41].

Por su parte, la Facultad de Ingeniería en Tecnologías de Información y Comunicación de la Universidad Pontificia Bolivariana propuso el uso de Radio sobre Fibra como una solución alternativa para la

nueva generación de redes inalámbricas y cableadas para futuras aplicaciones como el 5G, ya que al implementar esta tecnología se pueden transmitir señales de radio a grandes distancias con bajas tasas de error de bit y baja latencia, logrando obtener bajas tasas de VER en distancias superiores a 1 km [42].

En el año 2016, Flórez Guevara [43] analizó el desempeño de dos técnicas de compensación electrónica: algoritmo de módulo constante (CMA) y back-propagation (BP). Estas técnicas se utilizaron para compensar la degradación ocurrida a señales eléctricas en banda base y señales de Radio sobre Fibra, observando que ambos logaritmos logran disminuir la distorsión de la señal recibida. Para este análisis se empleó la herramienta computacional Matlab para las simulaciones. Se pudo concluir que las aplicaciones de RoF, CMA y BP presentan buen desempeño para redes de acceso, mientras BP actúa mejor para redes de área metropolitana.

En Bogotá, en el 2017, Díaz Díaz [44] presentó su trabajo de grado “Análisis de sistemas de Radio sobre Fibra usando fibras ópticas de plástico”, en el cual se exploraron los avances en la transmisión de información, encontrando que el objetivo en materia de entrega de servicios multimedia es una red convergente de fácil instalación, en la que se pretende alcanzar conexiones inalámbricas a las velocidades de transmisión de conexiones fijas de hasta 10 Gbps. Adicionalmente, se discutieron las ventajas que implica el uso de fibras ópticas de plástico en escenarios en lo que otros medios de transmisión pueden llegar a ser insuficientes, generar inconvenientes en la transmisión o sobrecostos innecesarios.

Un año después, Patiño [45], presentó el diseño de un sistema de Radio sobre Fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G, planteando la necesidad de usar un nuevo segmento del espectro radioeléctrico superior en frecuencias a los actualmente utilizados por los sistemas de comunicaciones móviles, estas frecuencias se denominan ondas milimétricas (MMW). En consecuencia, se presentó la tecnología de Radio sobre Fibra como la base del transporte de las señales convergentes entre la CO (central de procesamiento) y las RB (radio bases).

En otra investigación en el 2018, en la Universidad del Cauca se estudiaron los sistemas de Radio sobre Fibra aplicados a servicios Quad Play (voz/datos, video y radio - telefónico celular) para tecnologías FTTH. Se utilizó la herramienta de simulación OptSim con el fin de analizar el sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play. Finalmente, se evaluó el desempeño a nivel físico de la red FTTH-GPON, al integrar el módulo RoF, con base en los parámetros de monitoreo óptico [46]. Nuevamente en Bogotá, Castillo y Moreno [47] desarrollaron un transmisor de frecuencias de Radio sobre Fibra para tener una capacidad mayor de transmisión y pérdidas de propagación bajas, logrando un ancho de banda superior en transmisión de señales de RF. Para la elaboración del sistema se realizaron pruebas de laboratorio, concluyendo que con la implementación de este sistema se genera un bajo consumo de potencia.

En el 2019 se presentó un artículo de investigación científica denominado “Análisis del impacto de la conversión analógica a digital en el desempeño de sistemas de RoF digitalizado”, en el cual se evaluó numéricamente el impacto del proceso de digitalización en el desempeño de escenario Radio sobre Fibra digitalizado a frecuencia intermedia (IF-DRoF). El sistema IF-DRoF comprende una solución flexible de bajo costo, que extiende la distancia de transmisión y escala la tasa de bit con el producto $n \text{ bits} \times \text{frecuencia muestreo}$, comparando con el sistema RoF analógico. De esta forma, se demuestra que el rango dinámico es independiente de la distancia de transmisión, excepto cuando el nivel de señal cae por debajo de la sensibilidad del fotodetector del enlace óptico [48].

En ese mismo año, Ortiz Londoño [4] desarrolló un algoritmo, implementado en Matlab, que permitió la transmisión de señales en un canal óptico utilizando la técnica de multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) en el medio óptico, Radio sobre Fibra y el modelo matemático que describe un canal de fibra óptica. Presentó el análisis del modelo desarrollado a partir de las constelaciones de las señales a lo largo de la transmisión, centrándose en el desfase observado y el efecto de los esquemas de compensación de errores [49].

En el 2020, el Departamento de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia caracterizó un sistema de red híbrido de Radio sobre Fibra, operando en las frecuencias 60, 75 y 82 GHz, siendo la de 60 GHz banda de uso libre y las de 75 y 82 GHz bandas para las redes 5G, determinando la viabilidad del modelo y su alcance. Adicionalmente, se implementaron técnicas de Machine Learning que mejoraron el desempeño de la red, en términos BER. Este proyecto se dividió en dos etapas. En la primera se llevó a cabo un sistema de simulación en el que se desarrolló un sistema de Radio sobre Fibra y se caracterizaron parámetros del sistema. En la segunda se describió la etapa eléctrica de una red de comunicación utilizando un sistema de radio definido por *software* (SDR) [4].

Desde otro enfoque, en el 2020 Rodríguez Franco [50] presentó un trabajo de grado que consistió en la simulación de un enlace de Radio sobre Fibra para la transmisión de imágenes diagnósticas en patologías cardiorrespiratorias de neonatos, mostrando los resultados producto de la simulación en GNU radio de un enlace radio que compara la señal de transmisión cuando se envía una imagen radiográfica de tórax de 40.1 KB con data rates de 20 Mbps, 200 Mbps y 2 Gbps, en un escenario ideal, únicamente de radio con 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 de Radio sobre Fibra, comprobando que el prototipo es totalmente funcional con una tasa de error de bit cercana a cero.

Por otro lado, en el 2021 la Universidad Católica de Colombia publicó un trabajo de grado titulado “Sistema de RoF como plataforma física de transporte de datos de metrología en Colombia”, en el cual se simula un prototipo de red RoF aplicada a las necesidades del Instituto Nacional de Metrología

(INM). Este sistema RoF tiene como finalidad servir de plataforma física para el transporte de datos que requieran ser precisos, exactos, seguros, en tiempo real y con gran capacidad de transmisión [51].

3.3 Panorama regional

En el 2016, en Cúcuta, Torres y otros [5] a new mixed infrastructure called radio over fiber system (Radio over Fiber, RoF) describieron la simulación de un sistema RoF utilizando multiplexación WDM mediante el *software* Matlab, el cual tuvo como objetivo modelar y simular un sistema de Radio sobre Fibra para evaluar las degradaciones producidas por la dispersión que afectan la señal en la transmisión de información. Una de las degradaciones más significativas se produce por la atenuación que afecta la amplitud de la señal óptica en la salida en un factor de 0.22 dB/km. Implícitamente se nota que cada 31,5 km de longitud se cae 6 dB, por lo que se recomienda implementar una etapa de amplificación óptica en el fotorreceptor para recuperar adecuadamente la señal enviada [5].

En el 2016, la *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* presentó un artículo acerca del estudio, simulación y evaluación de los fenómenos ópticos no lineales, auto-modulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM), los cuales se muestran en una comunicación por fibra óptica y son generados por el efecto eléctrico-óptico Keer. El modelado de los fenómenos no lineales se efectuó en la herramienta computacional Matlab, para determinar las degradaciones producidas en la transmisión de información. En los resultados se evidenció que la incidencia de los fenómenos no lineales es directamente proporcional a la potencia óptica que adquiere la señal a la entrada del canal [52].

En el 2018, Puerto López y otros publicaron un artículo en el que mostraron la metodología para evaluar los efectos lineales y no lineales presentes en un sistema de Radio sobre Fibra, empleando la técnica de multiplexación por división de onda densa, con espaciados de 50 GHz, según las normas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, con una velocidad de canal de 10 Gbps, a una potencia de entrada en el canal óptico de 30 mW, para tramos de fibra óptica de 40, 60 y 80 km. Al final, se observó que los efectos que degradan la señal son proporcionales a las distancias de la fibra óptica establecidas y que la potencia óptica de entrada empleada es óptima para que la fibra se comporte como medio no lineal [53].

Finalmente, en el 2020 Roperó y otros [54] plantearon un sistema de comunicaciones óptico, en el que se modularon los datos usando modulación por desplazamiento de fase (PSK) y la técnica de multiplexación por división de frecuencia (FDM). De esta manera, se analizó el rendimiento de comunicaciones óptico, realizando una comparación entre los formatos de modulación Q-PSK, 8-PSK y 16-PSK. Se concluyó que el valor promedio de la tasa de error de modulación para 16-PSK está en un 41% mayor que en Q-PSK y 8-PSK, arrojando que el formato 16-PSK genera un mayor rendimiento y calidad en la transmisión de información para este tipo de sistemas [54].

CONCLUSIONES

Hoy por hoy, se ha evidenciado un crecimiento exponencial en el número de usuarios y dispositivos móviles conectados a redes de telecomunicaciones. Por esta razón, se describieron los avances de investigación acerca de los sistemas de Radio sobre Fibra, a través del tiempo, en los diferentes ámbitos, realizando una lectura minuciosa y de esta manera seleccionando los documentos de diferentes bases de datos. Este artículo permite observar la necesidad de cubrir las líneas de investigación en las áreas de las telecomunicaciones para estar a la vanguardia de la evolución tecnológica del mundo.

Adicionalmente, el desarrollo de la tecnología 5G soportará velocidades de banda ancha muy superiores a las tecnologías móviles actualmente en uso, facilitando de esta forma el desarrollo de tecnologías emergentes como vehículos autónomos, inteligencia artificial, robótica, internet de las cosas (IoT), entre otras. Una de las características más esperadas del 5G es su baja latencia, ya que tendrá tiempos de reacción de menos de 1 ms.

Los sistemas de Radio sobre Fibra poseen muchas ventajas, como su gran ancho de banda y su velocidad de transmisión. Aunque generalmente se emplee en las telecomunicaciones, su utilidad puede cubrir cualquier espacio en la electrónica. Finalmente, Radio sobre Fibra es una tecnología innovadora que puede preparar el camino para soluciones para redes 5G, despertando el interés en muchos países en cuanto a investigación y desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] Cisco, "Cisco Annual Internet Report (2018-2023)," 2018.
- [2] F. Alonso del Castillo, "Estudio analítico y experimental de la generación óptica de señales microondas sintonizables para medir la respuesta espectral de antenas", Universidad de Sonora.
- [3] E. Moutaly, "Etude d'une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G", Université Paris-Est, 2020.
- [4] D. F. Torres Vahos, "Diseño y simulación de un sistema de Radio sobre Fibra incluyendo demodulación basada en Machine Learning", Universidad de Antioquia, 2020.
- [5] A. D. T. Palencia, D. G. Ibarra, K. C. P. López, and F. G. López, "Linear effects present in a system of radio over optical fiber using wavelength division multiplexing", *2016 IEEE Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2016*, 2016, doi: 10.1109/ETCM.2016.7750843.
- [6] E. P. Martin *et al.*, "25-Gb/s OFDM 60-GHz radio over fiber system based on a gain switched laser", *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 8, pp. 1635–1643, doi: 10.1109/JLT.2015.2391994.
- [7] P. L. Gómez, "Evaluación de sistemas de comunicaciones ópticas y de radio sobre fibra a través de la caracterización de sus diferentes subsistemas y dispositivos", Universidad Autónoma de Madrid.

- [8] V. A. Thomas, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, "Performance improvement and cost reduction techniques for radio over fiber communications", *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 627-670, doi: 10.1109/COMST.2015.2394911.
- [9] D. Novak *et al.*, "Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 52, no. 1, 2016, doi: 10.1109/JQE.2015.2504107.
- [10] G. Stephanye and H. Moreta, "Diseño, simulación y pruebas de un laboratorio de sistema de comunicaciones ópticas usando Matlab, Communications System Toolbox, Simulink y OptiSystem", Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [11] Ali Kabalan, "Etude de systèmes radio sur fibre pour des applications de réseaux domestiques en bande millimétrique", Université Paris-Est, 2016.
- [12] C. H. Chang *et al.*, "FTTH and two-band RoF transport systems based on an optical carrier and colorless wavelength separators", *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 1, 2016, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2510331.
- [13] Z. Ibrahim, C. B. M. Rashidi, S. A. Aljunid, A. K. Rahman, and M. S. Anuar, "NRZ and RZ analysis for optical CDMA based on radio over fiber (RoF) technique", *2016 3rd Int. Conf. Electron. Des. ICED 2016*, pp. 151-154, 2017, doi: 10.1109/ICED.2016.7804626.
- [14] Y. Tian, K. L. Lee, C. Lim, and A. Nirmalathas, "60 GHz Analog Radio-Over-Fiber Fronthaul Investigations", *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 19, pp. 4304-4310, 2017, doi: 10.1109/JLT.2017.2740436.
- [15] C. Browning, E. P. Martin, A. Farhang, and L. P. Barry, "60 GHz 5G Radio-Over-Fiber Using UF-OFDM with Optical Heterodyning", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 23, pp. 2059-2062, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2763680.
- [16] L. Breyne, G. Torfs, X. Yin, P. Demeester, and J. Bauwelinck, "Comparison Between Analog Radio-Over-Fiber and Sigma Delta Modulated Radio-Over-Fiber", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 21, pp. 1808-1811, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2752284.
- [17] J. Morte Palacios, "Diseño CMOS de celdas RFIC para aplicaciones de radio sobre fibra RoF", Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Zaragoza, 2017.
- [18] C. Mateo Pérez, N. Pérez, P. García, P. L. Carro, J. De Mingo, and I. Salinas, "Linealización mediante predistorsión digital de un sistema Radio sobre Fibra de doble banda", *Jorn. Jóvenes Investig. del I3A*, vol. 5, pp. 2-3, 2017, doi: 10.26754/jji-i3a.201711938.
- [19] J. Clemente Vicente, "Linealización mediante predistorsión digital en un enlace de Radio sobre Fibra con rama de realimentación", Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Zaragoza, 2017.
- [20] P. T. Dat, A. Kanno, T. Umezawa, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Millimeter- and terahertz-wave radio-over-fiber for 5G and beyond", *Summer Top. Meet. Ser. SUM 2017*, pp. 165-166, 2017, doi: 10.1109/PHOSST.2017.8012702.
- [21] J. D. Cepeda, S. I. Rodríguez, M. Rico-Martínez, C. D. Muñoz, M. Varón, and I. T. Monroy, "Performance evaluation of a real time OFDM radio over fiber system at 2.5 GHz using software

- defined radio SDR”, *SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. IMOC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1-5, 2017, doi: 10.1109/IMOC.2017.8121094.
- [22] A. M. Souza, D. R. Celino, U. R. Duarte, and M. A. Romero, “Analog radio-over-fiber fronthaul by a WDM-PON employing double RSOA self-seeding and carrier-reuse techniques”, *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 17, no. 4, pp. 552-566, 2018, doi: 10.1590/2179-10742018v17i41546.
- [23] A. Dixit, “Architectures and algorithms for radio-over-fiber networks”, *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 5, pp. 535-544, 2018, doi: 10.1364/JOCN.10.000535.
- [24] J. Zacharias and S. MG, “Improving the Performance of RoF System by FBG in a CS-DSB based Wavelength reuse incorporating coherent detection and DSP”, *2018 2nd Int. Conf. Trends Electron. Informatics*, no. Icoei, pp. 1194-1198, 2018.
- [25] V. Singh, “Modeling and Simulation of OFDM Scheme Using QAM for Radio over Fiber”, Malaviya National Institute of Technology, 2018.
- [26] G. K. M. Hasanuzzaman and S. Iezekiel, “Multi-core Fiber Based Mm-wave Generation , Radio-over-Fiber , and Power-over-Fiber”, pp. 7-9.
- [27] T. Nikas, E. Pikasis, and D. Syvridis, “Static Skew Compensation in Multi Core Radio over Fiber systems for 5G Mmwave Beamforming”, *Proc. 2018 Photonics Switch. Comput. PSC 2018*, no. 1, pp. 1-3, 2018, doi: 10.1109/PS.2018.8751425.
- [28] S. A. Salueña, “Caracterización experimental y modelado de un VCSEL para el diseño de un laser driver con elevada linealidad para aplicaciones de radio sobre fibra con tecnología CMOS nanométrica”, Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Zaragoza, 2019.
- [29] C. Lim *et al.*, “Evolution of Radio-Over-Fiber Technology”, *J. Light. Technol.*, vol. 37, no. 6, pp. 1647-1656, 2019.
- [30] J. Kim *et al.*, “MIMO-Supporting Radio-Over-Fiber System and its Application in mmWave-Based Indoor 5G Mobile Network”, *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 101-111, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2931318.
- [31] J. Singh and A. K. Garg, “Optimal Solutions of Integrated Optical and Wireless Applications Using GPON-RoF Technologies”, *Proc. 3rd Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol. ICECA 2019*, pp. 526-531, 2019, doi: 10.1109/ICECA.2019.8821884.
- [32] H. Muwafaq, M. F. L. Abdullah, K. A. Omar, A. A. Qasim, A. M. Abdulrahman, and A. Dawood, “Radio over Fiber (RoF) Implementation using MZM For Long Distance Communication”, *2019 Int. Conf. Inf. Sci. Commun. Technol.*, pp. 1-6, 2019.
- [33] R. Singh and S. Kumar, “Radio Over Fiber Technology: A detailed review”, *Dep. Electron. Commun. Eng. Maharshi Dayanand Univ.*, no. March, pp. 6-8, 2019, doi: 10.1729/Journal.19735.
- [34] H. Li *et al.*, “Real-Time 100-GS/s Sigma-Delta Modulator for All-Digital Radio-Over-Fiber Transmission”, *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 2, pp. 386-393, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2931549.
- [35] D. T. Tran and N. T. Bui, “Improvements on the performance of subcarrier multiplexing/wavelength division multiplexing based radio over fiber system”, *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 1439-1449, 2020, doi: 10.11591/ijece.v11i2.pp1439-1449.

- [36] D. F. Paredes-Páliz, G. Royo, F. Aznar, C. Aldea, and S. Celma, "Radio over fiber: An alternative broadband network technology for IoT", *Electron.*, vol. 9, no. 11, pp. 1-8, 2020, doi: 10.3390/electronics9111785.
- [37] D. Rusdiyanto and C. Apriono, "Radio over Fiber for Implementing Digital Television Network in Indonesia", *Proc. - 2020 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. Humanification Reliab. Intell. Syst. ISITIA 2020*, pp. 321-325, 2020, doi: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163717.
- [38] C. Lim and A. Nirmalathas, "Radio-Over-Fiber Technology: Present and Future", *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 881-888, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.3024916.
- [39] Y. Li, F. Wang, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, "Analog radio-over-fiber-aided optical-domain MIMO signal processing for high-performance low-cost radio access networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 1, pp. 126-132, 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000479.
- [40] G. A. Florencia Ulloa, "Evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta", Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2021.
- [41] M.-O. R. Oswaldo, C.-M. M. Arturo, P.-L. G. Adolfo, and S.-F. C. Arturo, "Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica", *Ing. Investig. y Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 585-598, oct. 2015, doi: 10.1016/j.riit.2015.09.010.
- [42] K. A. Ortiz, F. R. Rodríguez, J. P. Velásquez, J. A. Guerrero, L. B. Agudelo, and F. Amaya-Fernández, "Implementación de una propuesta de Radio sobre Fibra para la comunicación de redes móviles basadas en Femtoceldas", *Colomb. Conf. Commun. Comput.*, no. September, p. 5, 2015.
- [43] R. de J. Flórez Guevara, "Compensación de los efectos de propagación en enlaces ópticos", Universidad Pontificia Bolivariana, 2016.
- [44] J. Z. Díaz Díaz, "Análisis de sistemas de radio sobre fibra usando fibras ópticas de plástico", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [45] A. Patiño, "Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [46] A. F. Escallón Portilla and V. H. Ruiz Guachetá, "Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF", Universidad del Cauca, 2018.
- [47] M. A. Castillo Álvarez and D. A. Moreno Calderon, "Transmisor en frecuencia RF basado en Radio sobre Fibra Óptica", Universidad Católica de Colombia, 2018.
- [48] E. Avendaño Fernández, J. J. Granada Torres, A. M. Cárdenas Soto, and N. Guerrero González, "Análisis del impacto de la conversión analógica a digital en el desempeño de sistemas RoF digitalizado", *Inge Cuc*, vol. 15, no. 1, pp. 77-88, 2019, doi: 10.17981/ingecuc.15.1.2019.07.
- [49] B. N. Ortiz Londoño, "Análisis del transporte de señales de radiofrecuencia utilizando multiplexación por división de frecuencias ortogonales óptico", Universidad Pontificia Bolivariana, 2019.
- [50] N. Rodríguez Franco, "Simulación de un enlace RoF para las transmisión de imágenes diagnósticas cardio respiratorias de neonatos", Universidad Católica de Colombia, 2020.

- [51] O. F. Castro-Rincón and E. V. Gómez-Mute, "Sistema de RoF como plataforma física de transporte de datos de metrología en Colombia", Universidad Católica de Colombia, 2021.
- [52] F. Gómez López, L. A. García Ortiz, K. C. Puerto López, and D. Guevara Ibarra, "Modelado de los fenómenos no lineales generados por el efecto electro-óptico Kerr en una transmisión por fibra óptica", *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 28, pp. 77-81, 2016.
- [53] K. C. Puerto López, R. P. Báez Parada, Á. D. Torres Palencia, and D. G. I. Guevara Ibarra, "Methodology for evaluating linear and non-linear effects in a radio over fiber system", *Respuestas*, vol. 23, no. 2, pp. 75-88, 2018, doi: 10.22463/0122820x.1740.
- [54] D. Roper-Torres, K. Puerto-López, and D. Guevara, "Evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando modulación por desplazamiento de fase QPSK , 8PSK y 16PSK, utilizando la técnica FDM . Evaluation of an optical communication system using QPSK , 8PSK and 16PSK phase shift modulation using the FDM", vol. 8, no. 2, pp. 76-83, 2020.