



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACION:
ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN Y TENDENCIA DE LA
TECNOLOGÍA RoF**

**Previa la obtención del Grado Académico de Magíster en
Telecomunicaciones**

ELABORADO POR:

Ing. Juan Gabriel Morales Serrano

DIRECTOR:

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

Guayaquil, Marzo de 2015



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster Juan Gabriel Morales Serrano como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, Marzo de 2015

DIRECTOR DE TESIS

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

REVISORES:

MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre

MSc. Orlando Philco Asqui

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, JUAN GABRIEL MORALES SERRANO

DECLARÓ QUE:

El Trabajo de Titulación “Estudio de la evolución y tendencia de la tecnología RoF”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, Marzo de 2015

EL AUTOR

Ing. Juan Gabriel Morales Serrano



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

YO, JUAN GABRIEL MORALES SERRANO

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría: “Estudio de la evolución y tendencia de la tecnología RoF”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, Marzo de 2015

EL AUTOR

Ing. Juan Gabriel Morales Serrano

Dedicatoria

Este trabajo de tesis de Posgrado está dedicado a **DIOS**, por darme la vida a través de mis queridos **PADRES** quienes con mucho cariño, amor y ejemplo han hecho de mí una persona con valores para poder desenvolverme como: **PADRE y PROFESIONAL.**

A mis **HIJOS**, que son el motivo y la razón que me ha llevado a seguir superándome día a día, para alcanzar mis más apreciados ideales de superación, ellos fueron quienes en los momentos más difíciles me dieron su amor y comprensión para poderlos superar, quiero también dejar a cada uno de ellos una enseñanza que cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que lo impida para poderlo **LOGRAR.**

Agradecimiento

A mi Dios por permitirme estudiar la Maestría y darme los dones de la sabiduría el entendimiento y fortaleza espiritual necesaria para la realización de este trabajo.

De la misma manera agradezco a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, por haberme dado la oportunidad de cursar mis estudios de Maestría Telecomunicaciones en este importante centro, empeñados en la formación de profesionales idóneos.

Al cuerpo docente del Posgrado en Telecomunicaciones, que impartieron sus conocimientos desinteresadamente, permitiendo que nos formemos como profesionales capaces y responsables.

Y a todas aquellas personas, que de alguna u otra forma prestaron su colaboración y ayudaron para llevar esta investigación adelante.

Resumen

En la actualidad los enlaces de radio sobre fibra aparecen como una excelente alternativa para la implementación de redes integradas, es decir sistemas que pretenden alcanzar la convergencia de las redes cableadas y aquellas inalámbricas.

En este trabajo de investigación se desarrolla un estudio del estado actual de esta tecnología a través de las publicaciones científicas más importantes realizadas sobre este tema. Se presentan las etapas principales del proceso de desarrollo que ha atravesado esta técnica, la evolución de los dispositivos empleados en ella y los resultados de los experimentos efectuados por diferentes científicos que indican que radio sobre fibra representa la integración de las redes como ya se indicó. El resultado de estas pruebas también permite vislumbrar la tendencia con miras al futuro de estos sistemas, el cual se avizora como la convergencia de servicios de telecomunicaciones en los dos tipos de redes. Se detalla cómo esta técnica continua evolucionando, lo cual permitiría el aumento de la frecuencia de operación de RoF hasta alcanzar la región de los 75 a 100 GHz, la cual presenta una elevada disponibilidad.

Abstract

Currently the radio over fiber links appear as an excellent alternative for implementing integrated networks, ie systems that aim to achieve convergence of wired networks and those wireless.

In this research a study of the current state of this technology is developed through the most important scientific publications on this topic. The main stages of the development process that has gone through this technique are presented, the evolution of the devices used in it and the results of experiments conducted by different scientists that Radio over fiber represents the integration of networks as already indicated. The result of these tests also provides a glimpse trend for the future of these systems, which is looming as the convergence of telecommunications services in the two types of networks. Details how this technique continues to evolve, which would increase the operating frequency of RoF reaching the region of 75 to 100 GHz, which has a high availability.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCION	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
JUSTIFICACION.....	3
HIPÓTESIS	4
METODOLOGÍA	4
CAPITULO 1: REDES DE FIBRA OPTICA.....	5
1.1 SISTEMAS CON CABLES DE FIBRA OPTICA	5
1.2 TIPOS DE FIBRA OPTICA	6
1.3 OPERACIÓN DE UNA RED DE FIBRA ÓPTICA.....	8
1.3.1 RED TRONCAL	8
1.3.2 RED DE ACCESO	9
1.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES.....	9
1.5 MONTAJE DE CABLES DE FIBRA OPTICA	10
CAPITULO 2: ESTADO ACUAL DE LA TECNOLOGIA DE RADIO SOBRE FIBRA RoF.	11
2.1 TOPOLOGÍA DE SISTEMAS ROF	15
2.2 TÉCNICAS DE MODULACIÓN Y RECEPCIÓN DE SEÑALES EN LA TECNOLOGÍA ROF	20
2.2.1 TRANSMISOR OPTICO	21
CAPÍTULO 3: DESARROLLO Y TENDENCIA DE LOS SISTEMAS ROF.....	27
3.1 EQUIPAMIENTO Y TECNICAS APLICADAS EN RoF.....	30
3.1.1 EQUIPAMIENTO EN SISTEMAS RoF.....	30
3.1.2 RANGOS DE TRANSMISIÓN OBTENIDOS EN RoF	31

3.2 REDES CONVERGENTES EN LA TECNOLOGÍA RADIO SOBRE FIBRA	36
3.3 RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	39
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES	45
GLOSARIO	46
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	49

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1.

Figura 1. 1 Esquema de un enlace punto a punto con fibra óptica.....	5
Figura 1. 2 Constitución de un cable de fibra óptica.....	6
Figura 1. 3 Constitución de un cable de fibra óptica.....	7
Figura 1. 4 Fibras monomodo y multimodo.	7
Figura 1. 5 Arquitectura de anillo de fibra óptica.	8
Figura 1. 6 Modelo de diseño de red de acceso.	9

Capítulo 2.

Figura 2. 1 Esquema de un sistema RoF.	15
Figura 2. 2 Redes de acceso de banda ancha para múltiples aplicaciones.....	19
Figura 2. 3 Curva de la corriente de alimentación vs. la potencia óptica	22
Figura 2. 4 El electrodo del modulador Mach-Zehnder	23
Figura 2. 5 Topología RoF	24
Figura 2. 6 Esquema de un receptor digital coherente para RoF – PM	25

Capítulo 3.

Figura 3. 1 Esquema del experimento realizado con VCSEL a frecuencia de 60GHz	33
Figura 3. 2 Esquema de un Sistema RoF que emplea transporte óptico WDM.....	35

INDICE DE TABLAS

Capítulo 2.

Tabla 2. 1 Protocolos inalámbricos.....	20
---	----

Capítulo 3.

Tabla 3. 1 Avances conseguidos con dispositivos en tecnología RoF en los últimos cinco años.....	37
Tabla 3. 2 Avances conseguidos con sistemas de tecnología RoF en los últimos cinco años.	38
Tabla 3. 3 Avances conseguidos con Redes Convergentes RoF en los últimos cinco años.	39

INTRODUCCION

En la actualidad la posibilidad de implementar enlaces de radio sobre fibra óptica han permitido un paso gigantesco en la evolución y desarrollo de las denominadas redes integradas con elevado rendimiento, en las cuales se pretende alcanzar la convergencia entre redes inalámbricas y cableadas.

Bajo esta perspectiva aparece en el entorno de las telecomunicaciones la tecnología RoF (*Radio over Fiber*) como una opción promisoría que permita brindar a los usuarios servicios multimedia actualizados y con una alta QoS (*Quality of Service*). Esto sería posible debido a que RoF permite tener la capacidad de las redes con cables de fibra óptica y al mismo tiempo la movilidad y adaptabilidad que permiten los sistemas inalámbricos.

Desde el punto de vista económico, esta alternativa permite disminuir los gastos que genera la construcción de redes de acceso, obteniendo con esta tecnología ventajas tales como altas tasas de transferencia de datos, anchos de banda amplios, alta adaptabilidad y variación del alcance de cobertura en función de los requerimientos de los abonados conectados a este tipo de sistemas.

Este trabajo de investigación pretende mostrar las tendencias actuales que se presentan en la tecnología RoF, partiendo de la revisión de la bibliografía existente al respecto de estos sistemas y analizando el rendimiento de los mismos, sus ventajas y limitaciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las telecomunicaciones modernas demandan mayores tasas de transmisión de acuerdo a la evolución de las aplicaciones y consiguiente un incremento del ancho de banda a utilizarse, estos requerimientos se incrementan por el masivo empleo de equipos móviles que pueden acceder a internet desde cualquier ubicación y con servicios en tiempo real.

Esta creciente demanda por parte de los clientes impulsa a las compañías de servicios de telecomunicaciones a evolucionar, implementando redes que puedan satisfacer tales

necesidades. Entre los medios de transmisión que cumplen las condiciones requeridas para telecomunicaciones de esta clase, se destaca la fibra óptica, cuyas características permiten alcanzar tasas de transmisión del rango de los Gigabits y actualmente anchos de banda en el orden de los Terahercios, en enlaces de gran longitud gracias a los rangos de atenuación entre 0.1 y 0.2 dB/Km que presenta. A todo lo indicado hay que añadir que a causa del material del que está construida la fibra óptica, es inmune al ruido. En las nuevas arquitecturas de redes ha demostrado su idoneidad para combinarse con otros sistemas de transmisión incluyendo los inalámbricos.

De esta manera, considerando a los cables de fibra óptica como complemento de otros sistemas de transmisión, surgen los sistemas híbridos, siendo actualmente ampliamente utilizadas las redes HFC (*Hybrid Fibre Coaxial*), que surge de la unión de cable de cobre y de fibra. Este trabajo de investigación pretende profundizar en otra clase de redes híbridas: las redes inalámbricas con las de fibra óptica, unión que permite la aparición de redes de radio sobre fibra óptica, a las que se denomina RoF, sobre las cuales deben realizarse amplios y profundos estudios para conseguir un óptimo funcionamiento en su conjunto.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La necesidad de conocer más profundamente la tecnología híbrida de transmisión de radio sobre fibra RoF y demostrar la viabilidad de su utilización en la implementación de redes de telecomunicaciones.

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

Para realizar la sistematización del problema de investigación se establecen las siguientes sub-preguntas:

¿Qué información existe acerca de la tecnología RoF?

¿Qué ventajas y limitaciones presenta esta tecnología?

¿Cómo ha sido la evolución de esta tecnología?

¿Qué tendencias se vislumbran en el desarrollo de esta tecnología?

¿Es viable su utilización en la implementación de redes de telecomunicaciones?

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez que se ha establecido el planteamiento, formulación y sistematización del problema de investigación, se pueden establecer los objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una investigación acerca de la tecnología de radio sobre fibra óptica (RoF) y demostrar la viabilidad de su utilización en la implementación de redes de telecomunicaciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar el estado actual de la tecnología RoF.
- Evaluar el desempeño de esta tecnología, sus ventajas y limitaciones
- Analizar las tendencias en el desarrollo de esta tecnología.
- Verificar la viabilidad de su utilización en la implementación de redes de telecomunicaciones.

JUSTIFICACION

La tecnología RoF emplea las propiedades y características de este medio de transmisión para el envío de ondas de radio a una estación base, por lo cual deben emplearse equipos ópticos que en el caso de utilizarse altas potencias muestran un comportamiento no lineal y consecuentemente ocurre atenuación, interferencia de intermodulación, entre otras consecuencias no esperadas.

Esto motiva la profundización del estudio de esta tecnología a fin de determinar el efecto de las características del medio de transmisión óptico al ser empleado en sistemas de comunicación de radiofrecuencia.

HIPÓTESIS

El desarrollo de un estudio acerca de la tecnología RoF que detalle sus principales equipos, así como las ventajas y limitaciones que presenta, permitirán demostrar la viabilidad de la integración de las redes de fibra óptica con los sistemas inalámbricos.

METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto de investigación se empleó la siguiente metodología:

Alcance: esta investigación es explicativa en virtud de que se busca determinar la razón de los hechos, específicamente de la tecnología RoF, un detalle de sus principales equipos, sus ventajas y limitaciones, aspectos que permitirán señalar la viabilidad de la integración de las redes de fibra óptica con los sistemas inalámbricos, mediante la determinación de relaciones causa-efecto, determinando sus causas, aplicando los principios de una investigación Ex post facto y sus consecuencias mediante la comprobación de la hipótesis que se ha planteado. Se ha considerado la aplicación del procedimiento Ex post facto porque se estudiará el desarrollo de la tecnología RoF y las relaciones causa-efecto que se establecen entre el equipamientos que emplea.

Se realiza una revisión de la bibliografía existente acerca de la tecnología RoF, los factores importantes de este recurso que permiten las transmisiones de radiocomunicación a través de los cables de fibra óptica.

Paradigma: Empírico-Analítico.

Enfoque: Es del tipo cualitativo porque se examinará la calidad del servicio que es posible obtener a través de la tecnología RoF y también es del tipo cuantitativo porque se utilizan cálculos matemáticos para presentar indicadores que permitan caracterizar esta tecnología.

Diseño de la investigación: no experimental transversal, debido a que solo se observan sin alterar las variables estudiadas y se procede al análisis de su operación.

CAPITULO 1: REDES DE FIBRA OPTICA

La información que se desea transmitir requiere para su transporte de un medio de transmisión, el cual debe ser adecuado para la capacidad y frecuencia en que se efectúa la propagación. Entre los medios de transmisión que se emplean actualmente, aparecen los cables de fibra óptica como uno de los que más ventajas ofrecen principalmente por las propiedades técnicas propias de su estructura de construcción.

La fibra empleada en la construcción de estos cables consiste en filamentos de vidrio de elevada pureza y muy compactos (Manfredi).

La información viaja por este medio de transmisión en forma de luz invisible, normalmente en el rango de la luz infrarroja, que constituye la portadora de los datos transmitidos.

1.1 SISTEMAS CON CABLES DE FIBRA OPTICA

En general, puede considerarse que en un sistema de comunicaciones puede ser representado mediante tres bloques, estos son el transmisor (donde se genera la información), el medio de transmisión (en este caso específico la fibra óptica que transporta la información) y el receptor (donde se recibe la información), como se muestra en la figura 1.1.

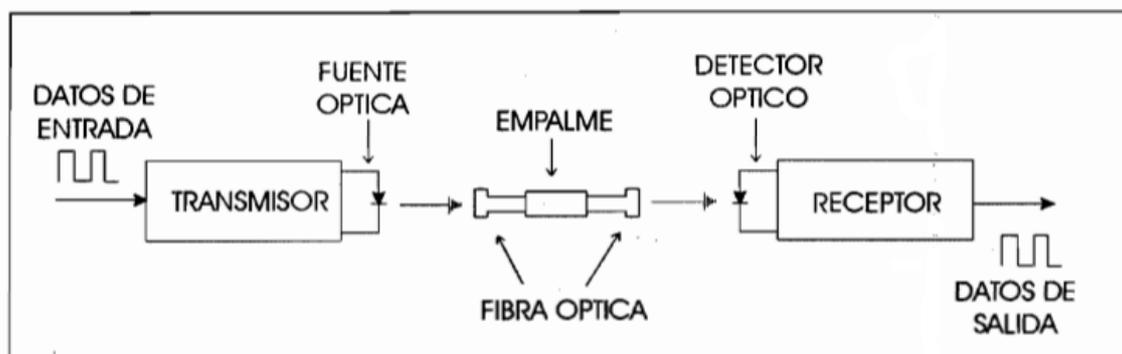


Figura 1. 1 Esquema de un enlace punto a punto con fibra óptica.

Fuente: (Jardon & Linares, 1995)

Como puede observarse en la figura 1.1, al transmisor ingresa la información de entrada, la misma que puede ser analógica o digital y de acuerdo a esto se acopla a una interfaz analógica o digital donde se ejecuta la modulación de la señal, generando la energía que alimenta a la fuente óptica, la cual puede ser un diodo LED (*Light-Emitting Diode*) o ILD (*Injection Láser Diode*), que emiten la señal luminosa de información hacia el núcleo del cable de fibra óptica.

En el terminal de destino se conecta el núcleo de la fibra al receptor, el cual contiene un detector óptico construido mediante un diodo PIN (*Positive Intrinsic Negative photodiodes*) o APD (*Avalanche Photodiode*), los cuales son sensibles a la luz incidente y generan una corriente que ingresa a un interfaz en que se ejecuta el proceso inverso realizado en el transmisor y se recupera la información original.

1.2 TIPOS DE FIBRA OPTICA

En la figura 1.2 puede observarse como está formada la fibra óptica, básicamente por un núcleo y su revestimiento, los cuales presentan índices de refracción distintos, siendo mayor el índice del núcleo, precisamente a través de éste viaja el haz de luz..

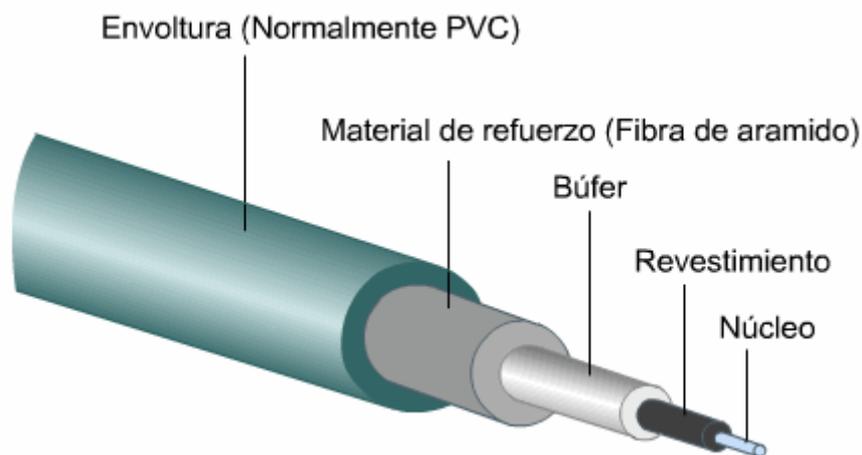


Figura 1. 2 Constitución de un cable de fibra óptica.

Fuente: (Urueña, 2005)

Un cable de fibra óptica se construye con uno o varios hilos recubiertos de algunas capas de material aislante, las cuales proporcionan al cable protección mecánica por la fragilidad del material del núcleo, aunque también protegen al cable de la humedad y

otros peligros que atenten contra la seguridad del cable y la información que contiene. Además en su interior puede contener hilos de cobre para transportar energía eléctrica para alimentar las repetidoras o para efectuar pruebas de las redes y el eje concéntrico posee un soporte de acero que brinda más resistencia mecánica. En el exterior se observa en la figura 1.3 una capa protectora que envuelve al cable.

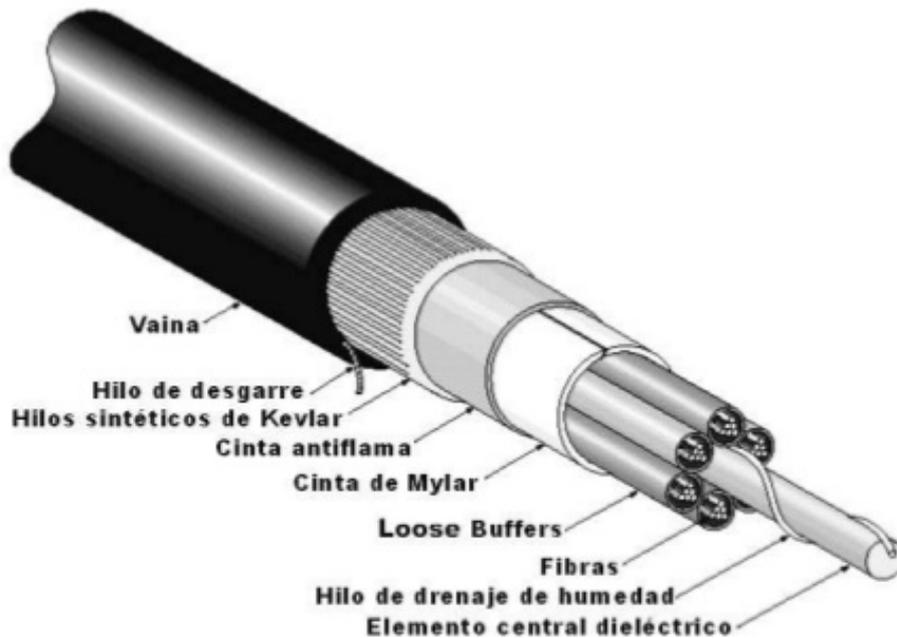


Figura 1. 3 Constitución de un cable de fibra óptica.

Fuente: (Bordallo, 2012)

Como ya se indicó, la luz viaja a través de la fibra por el núcleo, en base a esto se las puede clasificar en dos tipos por la forma en que se transmiten por él y a los cuales se denomina modos de propagación, así estos pueden ser monomodo y multimodo (Figura 1.4).

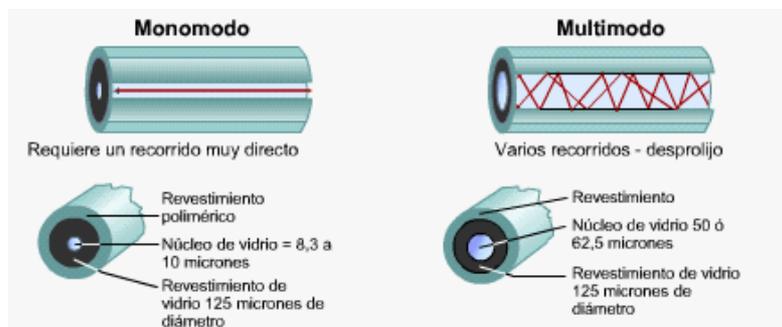


Figura 1. 4 Fibras monomodo y multimodo.

Fuente: (Urueña, 2005)

1.3 OPERACIÓN DE UNA RED DE FIBRA ÓPTICA

Una red de fibra óptica en sus inicios era implementada con la finalidad de cubrir los requerimientos de transmisión de datos especialmente para grandes alcances, incluyendo enlaces transoceánicos, sin embargo en la actualidad también se emplean para áreas urbanas sirviendo a clientes locales, con lo cual se incrementa el desempeño de los dispositivos y facilita el incremento del número de abonados. Bajo esta arquitectura de redes, las de fibra óptica presentan la red troncal y la de acceso

1.3.1 RED TRONCAL

Constituye el enlace entre centrales para el transporte de información, razón por la cual debe poseer gran capacidad y fiabilidad. Permite la interconexión de los nodos primarios que conforman la red de fibra óptica. Su arquitectura ofrece redundancia para garantizar la continuidad del intercambio de información entre las centrales. En la actualidad la topología más utilizada para obtener las características que se acaba de mencionar son las de tipo anillo. En la figura 1.5 puede verse un diseño de un anillo de fibra óptica que conecta cuatro centrales y contiene además dos equipos de cabecera, topología que permite la redundancia necesaria para impedir una potencial interrupción de la comunicaciones entre las centrales.

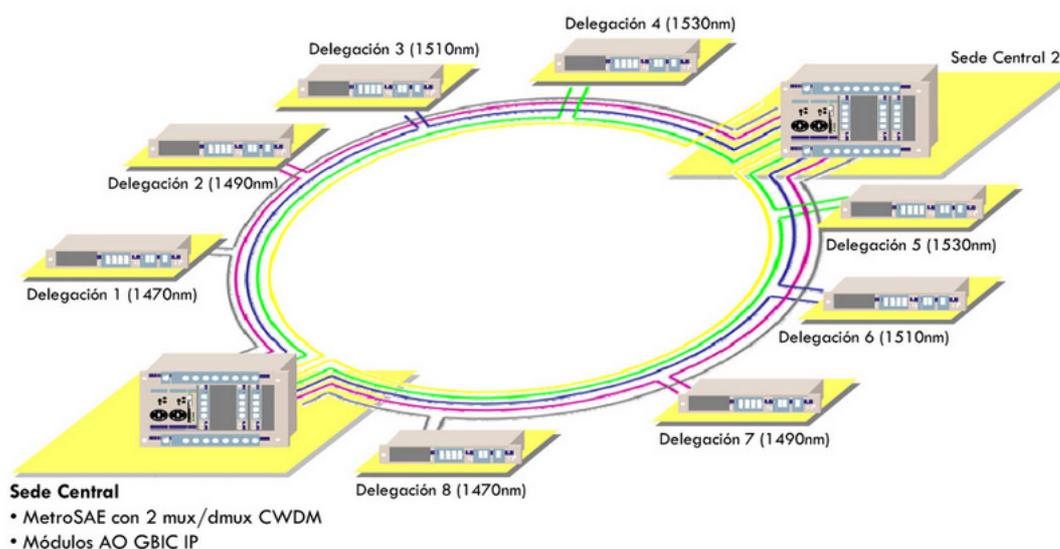


Figura 1. 5 Arquitectura de anillo de fibra óptica.

Fuente: (Telnet, Anillos ópticos xWDM)

1.3.2 RED DE ACCESO

Consiste en la etapa de la red que enlaza centrales de menor tráfico a las centrales principales conectadas a la red troncal. De esta forma éste sería su único enlace para el intercambio de información, por lo tanto si esa conexión se interrumpe esa central estará aislada. En la figura 1.6 se muestra a manera de ejemplo el esquema de la red de acceso diseñada en México para la Red CUDI (Corporación Universitaria para el Desarrollo de Internet), en la que se observan cinco centrales conectadas mediante un anillo de fibra óptica y dos centrales enlazadas a través de redes de acceso.

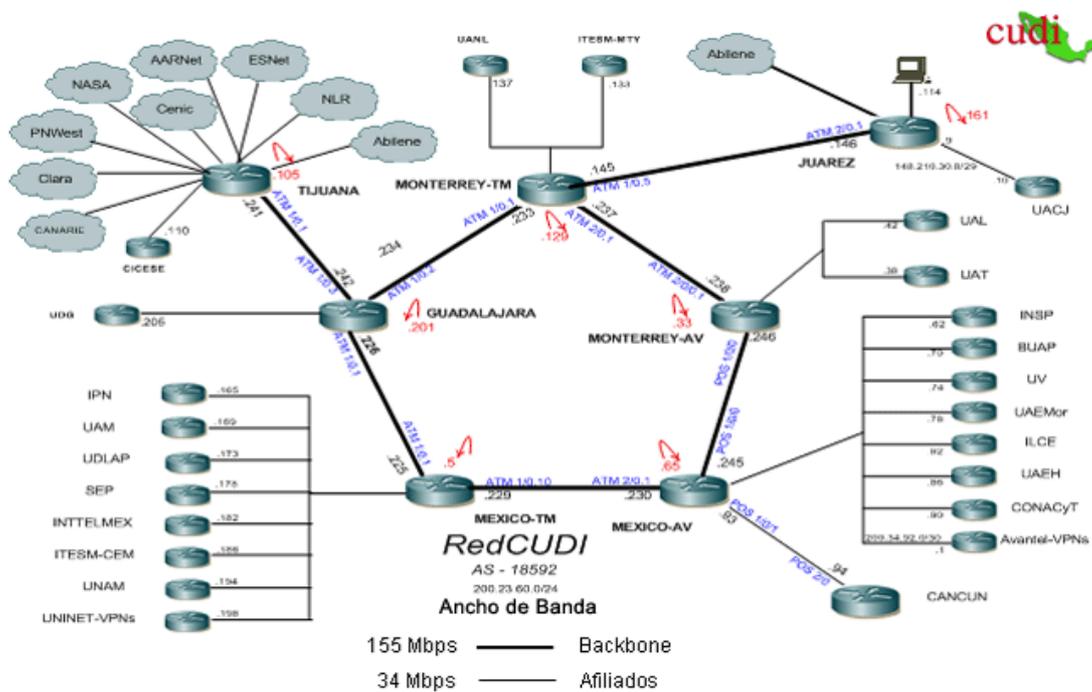


Figura 1. 6 Modelo de diseño de red de acceso.

Fuente: (CUDI, 2013)

1.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES

Entre las ventajas que presenta este medio de transmisión se pueden destacar las siguientes:

- Pequeñas dimensiones y peso.
- Facilidad de instalación a causa de su peso y diámetro

- Inmunidad a perturbaciones electromagnéticas
- No causa interferencia en fibras contiguas
- Es inmune a situaciones meteorológicas adversas
- Presenta baja atenuación por kilómetro (dB/Km)
- La atenuación en la fibra no depende de la frecuencia de operación
- La telemetría permite descubrir sencillamente las fallas que se produzcan en la red
- Por los materiales usados en su construcción no requiere defensas a tierra por descargas eléctricas que se puedan producir

Las limitaciones que presentan los cables de fibra óptica son las siguientes:

- Por los materiales usados en su construcción es frágil para su manipulación, especialmente durante su instalación
- El precio de los dispositivos es alto
- Las reparaciones de empalmes son complicadas y requieren conocimientos técnicos especializados
- Por los materiales usados en su construcción no permite flujo de energía por su núcleo

1.5 MONTAJE DE CABLES DE FIBRA OPTICA

Para el montaje y despliegue de redes de cables de fibra óptica, la ITU (*International Telecommunication Union*) ha estandarizado las normas pertinentes para la implementación de esas redes, así por ejemplo, para el caso del empleo de fibras monomodo ha promulgado las recomendaciones correspondientes a la serie G para los procedimientos y medios de transmisión, tales como ITU-T G.652D y ITU-T G.655.

En el caso del Ecuador, las normas a seguir para la instalación de cables de fibra óptica son emitidas por la CNT-EP (Corporación Nacional de Telecomunicaciones – Empresa Pública) a través de instructivos técnicos en los que se norman y estandarizan las operaciones correspondientes a la construcción de redes de telecomunicaciones.

CAPITULO 2: ESTADO ACUAL DE LA TECNOLOGIA DE RADIO SOBRE FIBRA RoF.

Cada día se incrementa la demanda de los clientes de las operadoras de telecomunicaciones para acceder a enlaces inalámbricos de manera constante mediante sus equipos móviles a tasas de transmisión de información muy altas sin acudir a terminales conectados a redes cableadas, pero la limitación que se presenta es que las redes inalámbricas no tienen el ancho de banda capaz de permitir las ya mencionadas altas capacidades de propagación, en redes Ethernet en la práctica se alcanza un gigabit en servicios inalámbricos. (Weiss, Huchard, Stohr, & Charbonnier, 2008).

En la actualidad equipos modernos como las *tablets* y los teléfonos celulares inteligentes requieren enlaces inalámbricos constantes, los cuales deben brindar una elevada tasa de transmisión de información, característica que las técnicas inalámbricas de hoy no pueden ofrecer pues no presentan el ancho de banda ni las tasas de transmisión que los abonados esperan obtener en su conexión. Nace aquí la posibilidad de obtener redes inalámbricas de banda ancha con esas propiedades indicadas mediante la aplicación de los sistemas RoF cuya topología puede brindar enlaces inalámbrico de elevadas tasas de transmisión a los clientes y también ofrecer las aplicaciones multimedia solicitadas por los abonados (Sharmaa, Singhb, & Sharmac, 2012).

La necesidad creciente de los abonados respecto a las aplicaciones de los servicios de telecomunicaciones ha provocado que el caso de la telefonía celular haya evolucionado rápidamente de la tercera generación a la cuarta, impulsando de esta manera a desarrollarse a tecnologías tales como UWB, GPRS (*General Packet Radio Service*), *Bluetooth* y la evolución de redes como WLAN. RoF implica la utilización de dispositivos y procesos ópticos para propagar ondas RF que se originan en las CS (*Control Station*) y viajan a las BS, posibilitando centralizar el proceso de la onda de radiofrecuencia en una sola ubicación mediante la utilización de cables de fibra óptica monomodo, los cuales tienen la propiedad de presentar únicamente pequeñas pérdidas de energía y por lo tanto resultarían muy eficientes para propagar ondas de radiofrecuencia a las BS (Sharmaa, Singhb, & Sharmac, 2012).

Teóricamente, se considera que para alcanzar velocidades de varios gigabits en servicios inalámbricos, deberá emplearse ondas portadoras a frecuencias en la banda EHF (*Extremely High Frequency*), que va de 30 a 300 GHz, debido a que su longitud de onda es de rango milimétrico y por lo tanto tiene mayor ancho de banda en esas frecuencias. Así por ejemplo, en Japón la frecuencia de 60 GHz dispone de un ancho de banda de 7 GHz que va de los 59 GHz a los 66 GHz, para la misma frecuencia en Corea del Sur y Norteamérica la banda es de 57 GHz a 64 GHz. (Stohr, 2011)

La organización IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ha encargado al grupo de trabajo IEEE 802 el estudio de redes WPAN (*Wireless Personal Area Networks*), en el cual el subgrupo IEEE 802.15.3c se encarga del ancho de banda de redes inalámbricas que trabajan a 60, se trata de cortos alcances de hasta 10m plantean redes internas inalámbricas con longitudes de onda milimétricas para tasas superiores a un gigabit. (Stöhr, y otros, 2009).

Precisamente en el desarrollo de técnicas que operen con longitudes de onda milimétricas surgen inconvenientes tales como el precio de los dispositivos electrónicos empleados y el incremento de las BS (*Base Station*) necesarias. Adicionalmente, el envío de señales con longitudes de onda milimétricas requiere más energía por la cantidad de pérdidas que se producen en el medio de transmisión, causando problemas para su implementación. Problemas como los indicados se resuelven con la aplicación de la tecnología RoF, que aparece como una de las alternativas más convenientes pararedes de acceso.

Al utilizar cables de fibra óptica para la transmisión de señales con longitudes de onda milimétricas, se obtienen ventajas tales como la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, su alta capacidad de transmisión y atenuaciones de apenas 0,2dB/km a 0,5dB/km según la clase de fibra empleada y la ventana de operación. Nótese que los valores de atenuación indicados para los cables de fibra óptica son muy bajos en comparación a los que se obtienen en propagaciones por el cobre o por el espacio libre. (Smith, Novak, & Lim, 1998).

Los sistemas RoF que trabajan con señales con longitudes de onda milimétricas necesitan la implementación de células pequeñas por el corto alcance de sus trayectorias (Mitchell, 2009).

Enlaces de radio de longitudes de onda milimétricas son considerados para usarse en sistemas de acceso, redes inalámbricas internas y servicios micro opico celulares de banda ancha. Esta integración de servicios de radio con redes de fibra óptica aparece como una adecuada alternativa para implementar sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, obteniéndose así opciones para las redes de acceso, ampliación de cobertura e incremento de capacidad en sistemas de radio. Bajo la perspectiva anotada, la tecnología RoF representa la integración apropiada de los sistemas de radio y los ópticos, cada una de las cuales independientemente constituyen técnicas primordiales en la evolución de las comunicaciones, pero cuyas redes de acceso de fibra óptica e inalámbricas, necesitan ser modernizadas para hacer frente al extraordinario incremento de la demanda de ancho de banda a causa de las nuevas aplicaciones y servicios.

Este escenario permite vislumbrar un desarrollo de las redes de acceso que permita garantizar la disponibilidad de aplicaciones multimedia de banda ancha los abonados donde quiera que estén y cuando lo requieran.

Este trabajo de investigación pretende presentar los temas más relevantes en el progreso de la tecnología RoF, para lo cual se parte de la exploración de la bibliografía acerca de este tema. A partir de la revisión de los artículos científicos más destacados acerca de la tecnología RoF, se obtuvieron resultados que fueron ordenados en cuanto a su aplicación a la banda de longitudes de onda milimétricas para presentar los factores más relevantes de la topología de estos sistemas y los adelantos y particularidades en los proyectos de modulación y recepción. Gracias al ordenamiento de los resultados fue posible reconocerlos factores fundamentales que permiten vislumbrar las tendencias de la tecnología RoF para longitudes de onda milimétricas y comprender los desafíos técnicos que deben revolve al diseñar equipos y receptores digitales.

Con la información obtenida en el desarrollo de este trabajo de investigación se realiza una reseña de las propiedades más importantes de la propagación mediante la tecnología

RoF en la banda de longitudes de onda milimétricas, sus ventajas y desventajas, así como la trascendencia al planificar servicios para trayectorias pequeñas pero que requieren amplio ancho de banda. Estos resultados también demuestran la repercusión que provocarán los nuevos desarrollos en lo relacionado con sistemas capaces de sustentar la integración de aplicaciones entre la red cableada de acceso y la inalámbrica. Estas nuevas investigaciones que se realizarán favorecerán la evolución hacia sistemas preparados para proveer diversas aplicaciones paralelamente mediante la misma infraestructura.

Como puede observarse, la tendencia permite vislumbrar que se pretende conseguir enlaces inalámbricos con tasas de transmisión iguales a las de las redes fijas, es decir del orden de los 10 Gbps., a cuyo objetivo se pretende llegar a través de la evolución de la tecnología RoF en la banda de las longitudes de onda milimétricas que permiten tener más ancho de banda, pero esto implica también la necesidad de diseñar nuevos dispositivos que trabajen en tales frecuencias, así como optimizar las formas de modulación existentes y desarrollar nuevos receptores digitales coherentes fundamentados en DSP (*Digital Signal Processing*).

Además, es importante mencionar la importancia que reviste la compensación del fenómeno de dispersión cromática en los cables de fibra óptica empleando métodos ópticos o mediante DSP, considerando que dicha dispersión se constituye en la mayor limitación para propagaciones en la banda W que va de los 75GHz a los 110GHz, donde se supone que tenderán a transmitir las redes RoF en el futuro y que constituirán el sustento de las redes de acceso de banda ancha en la próxima generación.

Entre los tipos de cables de fibra óptica utilizados actualmente y particularmente aquellos cuyas características permiten su empleo en las redes de nueva generación, es importante indicar que la ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) normaliza estos cables ya sean monomodo o multimodo, así como sus características y mediciones correspondientes. De esta manera, los parámetros ópticos, geométricos y de propagación de los cables ópticos del tipo monomodo que son usualmente empleados para transmisiones de largo alcance, corresponden a fibras G.652 y G.655 (Telnet, 2009).

Los tipos de fibra óptica indicados en el párrafo anterior corresponden a aquellas perfeccionadas para ser empleadas en la ventana de la longitud de onda de 1310nm, sin embargo pueden aplicarse a otras ventanas. Las clases de fibras G.652.A y B muestran un vértice para la curva de atenuación a causa de la existencia de moléculas de OH- a longitudes de onda de 1383nm, en cambio las fibras G.652.C y D no presentan este vértice. Existen fibras ópticas que permiten reducir el coeficiente PMD (*Polarization Mode Dispersion*) en el enlace a $0,20\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$, de esta manera se pueden obtener velocidades de propagación muy altas en relación al alcance. También en esta clase de fibras se han mejorado las tolerancias de ciertas características para optimizar los beneficios que brindan estos cables (Telnet, 2009).

2.1 TOPOLOGÍA DE SISTEMAS ROF

Este trabajo de investigación de acuerdo a las características que se detallaron anteriormente, se centrará en aquellos sistemas basados en tecnología de radio sobre fibra que trabajan en la banda de las longitudes de onda milimétricas, los cuales emiten señales de radio a través de la fibra óptica hacia la BS, si se tiene algunas de estas estaciones base, se requiere un dispositivo pasivo denominado *splitter*, el cual distribuye la señal a las BS, (Milosavljevic, Kourtessis, Gliwan, & Senior, 2009), como puede observarse en la figura 2.1.

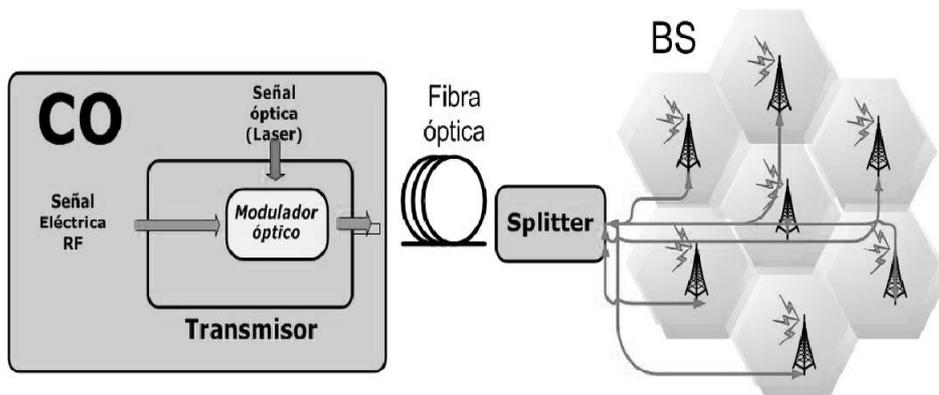


Figura 2. 1 Esquema de un sistema RoF.

Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)

Como puede observarse en la figura 2.1, el sistema de RoF emite ondas de radio mediante los cables de fibra del equipo transmisor ubicado en la CO a la BS, desde las cuales se distribuye las señales a los abonados vía radio.

En realidad, la topología en que opera la tecnología de radio sobre fibra funciona en el rango de frecuencias EHF que corresponde a las señales MMW y que ofrecen anchos de banda de unos 7GHz (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011).

Uno de los principales escollos que enfrentan los fabricantes de equipos de telecomunicaciones para desarrollar equipos y dispositivos que operen bajo las condiciones mencionadas en el párrafo anterior es su costo, puesto que la propagación de ondas MMW requiere transmisores de más potencia a causa de las pérdidas que se producen en el espacio libre por el que se van a propagar. Esta característica obliga a pensar en emplear un medio de transmisión diferente que reemplace al transporte de información por el espacio libre, surge entonces como alternativa el empleo de cables de fibra óptica a través de los cuales se transmitiría ondas de radiofrecuencia.

Esta alternativa tecnológica representada por los sistemas de transmisión de radio sobre fibra representa las siguientes ventajas:

- Elevada tasa de propagación de información
- Ancho de banda en el rango de los gigahercios
- Reducida atenuación
- Libre de alteraciones electromagnéticas
- No genera interferencias
- Es durable, resistente al calor, al frío y a la corrosión (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)

De acuerdo a lo que se ha indicado en párrafos anteriores, el objetivo fundamental que se persigue alcanzar mediante la utilización de la metodología de transmisión de radio sobre fibra consiste en la entrega de información en formato de banda ancha a las BS mediante cables de fibra y de éstas brindar conexiones inalámbricas a los usuarios. En consecuencia, para alcanzar este objetivo se requiere un transmisor óptico, los cables de

fibra, las BS y los equipos receptores de los usuarios, los cuales pueden ser inalámbricos o fijos(Herschel & Schaffer, 2011).

Entre las ventajas que representa para los sistemas de comunicación la adopción de la tecnología de radio sobre fibra, se destaca la capacidad de agrupar los componentes más caros del equipamiento de alta frecuencia en una CO (*Central Office*), la cual también es conocida como CS (*Control Station*), en la cual está ubicado el transmisor óptico produciendo las señales ópticas MWM y también recibiendo las ondas de la conexión entrante, los cables de fibra óptica van de la Co a la BS, de esta manera es posible la implementación de los dispositivos restantes en una ubicación apartada a causa de su simplicidad, pequeño tamaño, bajo peso y reducido gasto de energía (Milosavljevic, Kourtessis, Gliwan, & Senior, 2009).

Es importante indicar en este punto en que se está tratando acerca del cableado de fibra óptica, el cual puede alcanzar algunos kilómetros de distancia, que este tipo de medio de transmisión presenta no linealidades que se exteriorizan en forma de dispersiones estimuladas, conocidas como SRS (*Simulated Raman Scattering*), que radican en la interacción entre los fotones que inciden sobre el material y las vibraciones que tienen las moléculas o los átomos de este y, reciben el nombre de fotones ópticos. La luz incidente se dispersa por acción de las moléculas produciéndose un desplazamiento en frecuencia. La segunda no linealidad que presenta la fibra es el denominado efecto electro-óptico cuadrático o de Kerr producido por las variaciones en el índice de refracción del material a causa de un campo electromagnético aplicado, en este caso la potencia óptica. La SRS causa disminución o aumento de la señal, en cambio el efecto Kerr como ya se indicó genera un desplazamiento de fase de la misma. Este efecto de dispersión puede atenuarse empleando fibras de tipo desigual para transmisión y recepción (Lee, 2000).

Aparecen como ventajas adicionales de esta tecnología que se está estudiando, su amplio ancho de banda que provee la fibra para la propagación de señales RF (Radiofrecuencia), el incremento de la flexibilidad operativa y la capacidad para distribuir entre un número específico de abonados las aplicaciones instaladas(Campos & Sabogal, 2006).

Esta tecnología opera en la banda EHF que va de 30GHZ a 300GHZ y que corresponde a las longitudes de onda MMW (*Millimeter Wave*) (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011).

En los sistemas RoF, las estaciones base se aplican solo para realizar el cambio óptico-eléctrico, por lo cual su configuración puede ser más simple y autónoma en relación a la modulación aplicada (Taniguchi, Sakurai, Kimura, & Kumozaki, 2009).

Lo indicado en el párrafo anterior indica que en la BS se requiere instalar un receptor óptico en el que se ejecutará la transformación óptico-eléctrica, nótese en este punto que las ondas luminosas incidentes son del tipo MWM y por lo tanto el receptor deberá operar a elevada velocidad. Luego de la transformación, las ondas eléctricas generadas pasan por un amplificador de radiofrecuencia y finalmente son transmitidas a través de la antena, estas ondas de radiofrecuencia viajan por el espacio libre a los equipos terminales de los usuarios (Chen, y otros, 2007).

Actualmente, las aplicaciones IP (*Internet Protocol*) se diseñan y ejecutan mediante enlaces en su mayoría inalámbricos, de esta manera los abonados ingresan a internet mediante sus receptores inteligentes empleando alguna de las aplicaciones que les ofrecen (Stohr, 2011).

A continuación, en la figura 2.2 se puede el esquema de diversas redes de acceso de banda ancha implementadas para múltiples aplicaciones.

Como ya se señaló anteriormente, la mayor parte del procesamiento de la información se ejecuta en la CO, aquí se la codifica, multiplexa y modula en RF, de esta manera se reducen los costos de la BS y se mejora su eficiencia. Estas características presentan a los sistemas de transmisión de radio sobre fibra como una excelente alternativa a aplicarse en las comunicaciones de próxima generación en conjunto con la modulación OFDM (Rao, Sun, Li, & Huang, 2006).

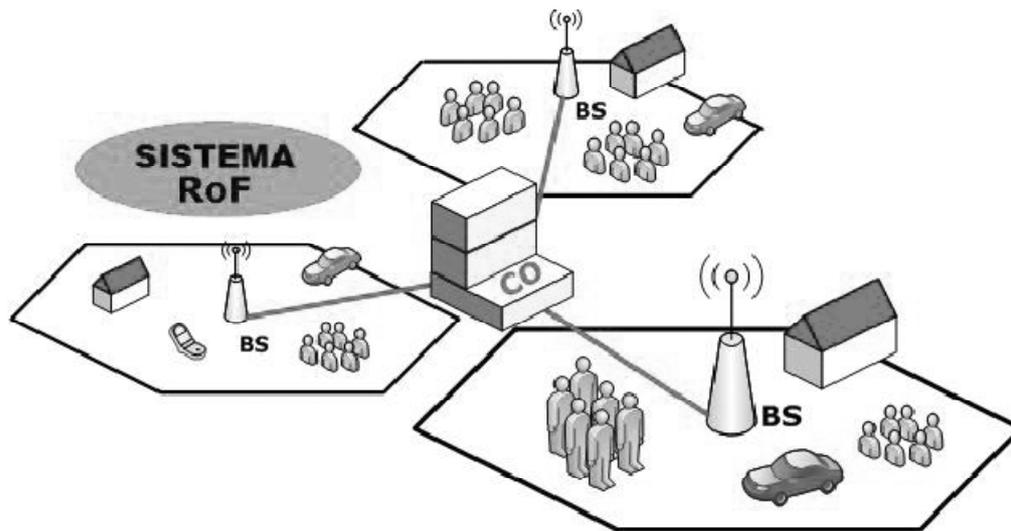


Figura 2. 2 Redes de acceso de banda ancha para múltiples aplicaciones

Fuente: (Guerrero, Tafur, & Zibar, 2011)

Con la finalidad de generar equilibrio en la cobertura de los sistemas inalámbricos es necesario ordenarlos en una técnica DAS (*Distributed Antennas System*), cuya adopción es un procedimiento frecuente para expandir la cobertura inalámbrica mediante varias estaciones base hacia diferentes destinos (Fabbri & Faccin, 2007).

La tecnología DAS constituye una forma de enfrentar aquellos espacios incomunicados con baja cobertura que se encuentran en los interiores de las edificaciones gracias a la implementación de un conjunto de antenas pequeñas que funcionan como repetidoras. Estas antenas se instalan físicamente enlazadas a un centro de control conectado a la BS de la red inalámbrica, estos sistemas DAS trabajan en radiofrecuencia en el rango de las aplicaciones inalámbricas.

Los sistemas DAS pueden ser pasivos si captan ondas inalámbricas mediante antenas de techo y las propagan mediante cables por el edificio y activos cuando la señal captada en la antena instalada en el techo se distribuye mediante cables de fibra óptica.

Al aplicar la tecnología RoF, los sistemas se diseñan para ejecutar actividades que corresponden a procedimientos de radio, adicionalmente a las actividades de transferencia y movilidad, tales actividades envuelven la modulación de las señales, el proceso de la información y la modificación de la frecuencia.

2.2 TÉCNICAS DE MODULACIÓN Y RECEPCIÓN DE SEÑALES EN LA TECNOLOGÍA ROF

En los sistemas que utilizan tecnología RoF, el procedimiento de modulación se concibe como dos procesos: uno eléctrico y uno óptico. Bajo esta perspectiva, en primer lugar se obtiene la señal eléctrica a la cual se ha modulado en amplitud, fase o frecuencia de acuerdo a las técnicas tradicionales para este tipo de señales. La onda eléctrica producida de esta manera tiene que cumplir los requerimientos de los servicios inalámbricos, como por ejemplo WLAN (*Wireless Local Area Network*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), GSM (*Global System for Mobile communications*), etc.

A continuación, en la tabla 2.1, se detallan diferentes protocolos inalámbricos con sus respectivas velocidades de transmisión, frecuencia de portadora y el alcance de su trayectoria.

Tabla 2. 1 Protocolos inalámbricos. Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)
Elaborada por el Autor

Protocolos inalámbricos	Tasa de transmisión	Frecuencia de Portadora	Alcance
ZigBee	< 250 kbps	915 MHz, 2.4 GHz	Corto
WiBree	< 1 Mbps	2.4GHz	Corto
Bluetooth	< 1 Mbps	2.4GHz	Corto
Wireless USB	< 480 Mbps	3.1 GHz - 10.6 GHz	Corto
802.11b	< 11 Mbps	2.4GHz	Medio
802.11a/g	54 Mbps	2.4 GHz / 5 Ghz	Medio
802.11n	< 300 Mbps	2.4 GHz / 5 Ghz	Medio
GSM	9.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
GPRS 2.5G	171.2 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
EDGE 2.75G	473.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
UMTS (3G)	2 Mbps	1.8GHz a 2.2GHz	Largo
HSDPA 3.5G	14 Mbps	1900 MHz, 2100 MHz	Largo
HSPA+	42 Mbps	1700 MHz, 2100 MHz	Largo

WRAN	18 Mbps	54 Mhz - 862 MHz	Largo
WiMAX	75 Mbps	2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5GHz	Largo
NBWA	80 Mbps	< 3.5 GHz	Largo
LTE 4G	< 144 Mbps	1900 Mhz - 3600 MHz	Largo
LTE advanced	< 1 Gbps	1900 Mhz - 3600 MHz	Largo
WiGig	7 Gbps	2.4 GHz, 5 GHz y 60 GHz	Corto
Wireless HD	25 Gbps	60 GHz	Corto

La topología para la aplicación de la tecnología de radio sobre fibra, comprende la modulación de la portadora óptica mediante una onda de radio que presenta una portadora RF, se procede entonces a enviarla a través de una ruta de cable de fibra óptica cuya trayectoria va desde la oficina central y se conecta a un grupo de estaciones base. Esta configuración se mostró en las figuras 2.1 y 2.2 anteriormente.

Dentro de este sistema el procedimiento para la transformación de la señal eléctrica a una óptica se realiza empleando la modulación de láser, en la cual la onda eléctrica consigue que se module la intensidad de la luz láser, produciendo una serie de encendidos y apagados de la misma de acuerdo a la información que se esté transmitiendo, considerándose el encendido o presencia de la luz como un estado de 1 lógico y el apagado o ausencia de luz como el estado 0 lógico.

2.2.1 TRANSMISOR OPTICO

Este dispositivo debe producir señales luminosas del tipo MWM que propagarán la información mediante ondas de radiofrecuencia a las BS, esta producción de las ondas y la estructura sencilla de las BS se constituyen en características fundamentales de esta tecnología, las cuales posibilitan la reducción de gastos y el incremento de la eficiencia de las redes de fibra. En este punto es importante indicar que constituye un reto para los investigadores la producción de señales MWM sobre los 40GHz a causa de las limitaciones de los moduladores ópticos en lo referente a su respuesta de frecuencia. Así, se tiene el caso del modulador externo MZM que presenta una respuesta adecuada bajo los 40GHz, por consiguiente se requiere un procedimiento que produzca ondas

luminosas que operen a frecuencias más altas sea superior y el precio de los equipos sea menor.

En los enlaces de fibra de los sistemas de radio sobre fibra, las ondas luminosas MWM es posible producirlas mediante osciladores, pero el desempeño se reduce al elevarse la frecuencia.

En el receptor se emplea un dispositivo fotodetector para la transformación de la señal óptica recibida en una señal eléctrica, la cual posteriormente es amplificada y enviada a una antena para su propagación. El procedimiento detallado corresponde a la técnica denominada IM/DD (*Intensity Modulated Direct Detection*), la cual es la más sencilla y utilizada en su forma tradicional en que un diodo laser es modulado de manera directa por la onda eléctrica incidente mediante la corriente de alimentación, a continuación en la figura 2.3 se puede observar la curva característica correspondiente a un diodo laser, en la cual la pendiente de la misma en su región lineal es la eficiencia láser, en este gráfico el eje horizontal corresponde a I_L (corriente de alimentación) y el eje vertical a P_o (potencia óptica). (Li, Mardling, & Armstrong, 2007) (Cardona & Fernández, 2009)

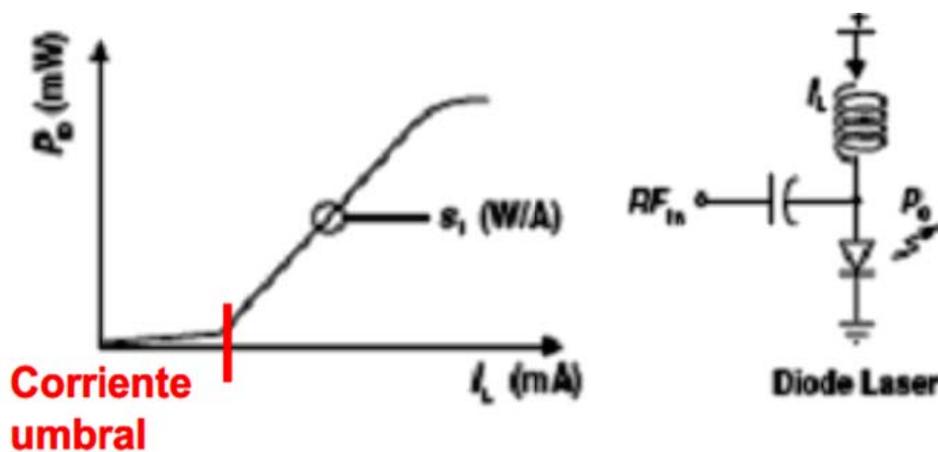


Figura 2. 3 Curva de la corriente de alimentación vs. la potencia óptica

Fuente: (Cardona & Fernández, 2009)

Este tipo de modulación directa es económica y funciona adecuadamente en servicios de bajo costo y para trayectorias pequeñas y bajas tasas de transmisión.

Cuando las frecuencias de operación superan los 10 GHz, la aplicación de la modulación directa del láser que se describió en el párrafo anterior puede generar inconvenientes a causa del ancho de banda del diodo empleado es limitado. Entonces en estos casos los procesos IM/DD emplean la modulación externa, en la cual se emplea el modulador externo MZM (*Mach-Zehnder Modulator*), que permite que la fuente de luz opere con un rango constante de alimentación, lo cual permite prolongar la vida útil del dispositivo, además se alcanza más velocidad de modulación debido a que no depende del flujo de electrones en el diodo y también disminuye la modulación de fase residual (*chirp*) que causa inconvenientes en la transmisión. (Kim, 2005)(Cardona & Fernández, 2009).

En la figura 2.4 se muestra el esquema de un electrodo del modulador, en el cual la onda eléctrica RF se propaga por la línea coplanar del electrodo, causando la alteración del índice de refracción del láser.

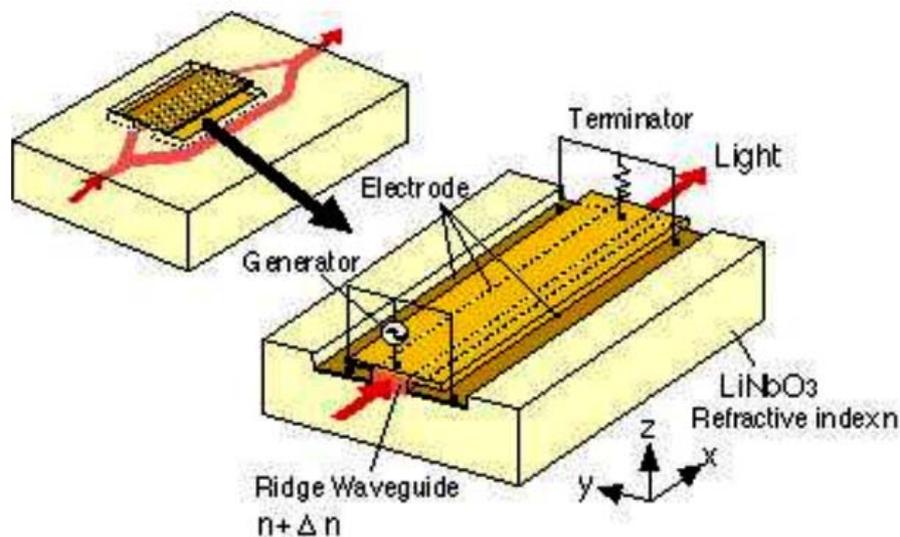


Figura 2. 4 El electrodo del modulador Mach-Zehnder

Fuente: (Cardona & Fernández, 2009)

La modulación externa permite alcanzar ventajas tales como una mayor linealidad y ancho de banda y prácticamente la eliminación del chirp. Además del modulador externo Mach-Zehnder, también es frecuente la utilización del modulador EAM (*Electro-Absorption Modulator*), los cuales se fundamentan en la dependencia con el

campo eléctrico de la frontera de la banda de absorción del semiconductor. Estos moduladores son más lineales que los MZM (Pastor, ramos, & Capmany, 2007).

La topología de un sistema que utiliza tecnología de radio sobre fibra se presenta a continuación en la figura 2.5.

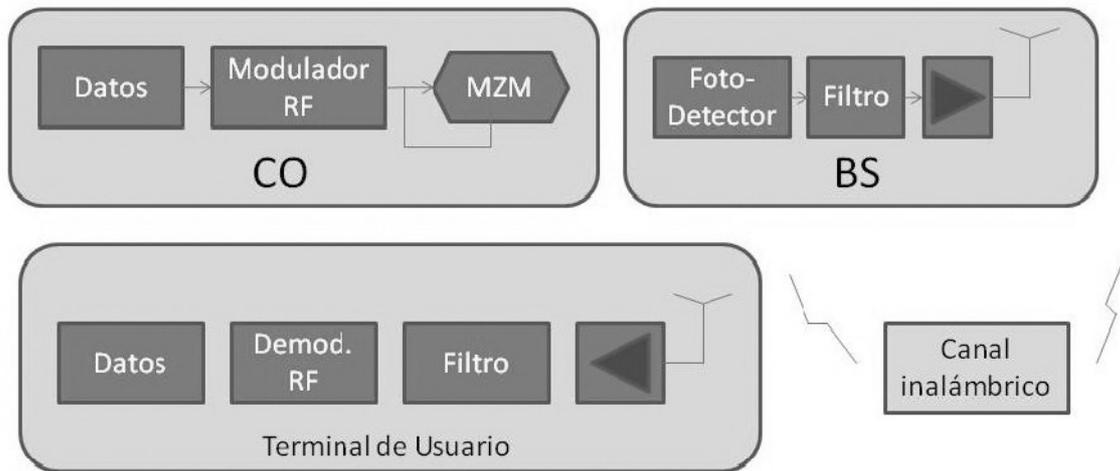


Figura 2. 5 Topología RoF

Fuente: (Dadrasnia & Adikan, 2010)

Adicionalmente, puede emplearse la generación óptica remota de forma heterodina para la propagación de ondas RF a través de los cables de fibra óptica. En este procedimiento, la fuente óptica genera más de una señal luminosa y una de ellas se modula mediante la onda que transporta los datos, posteriormente se combinan o heterodinan en el dispositivo fotodetector o mediante un mezclador externo lo cual permite generar la onda RF de salida (Kim, 2005). La ventaja de este procedimiento es la generación de ondas RF y su limitación estriba en el ancho de banda del dispositivo fotodetector. Este método permite una recepción de mayor potencia y por consiguiente una mejor relación CNR (*Carrier to Noise Ratio*), en razón de que ante determinadas circunstancias las potencias luminosas de los dos campos ópticos interfieren y esto incrementa la energía de la onda luminosa producida. (Ng'oma, 2005).

Es también necesario considerar que las conexiones de radio sobre fibra que producen la modulación PM (*Phase Modulation*) de la onda luminosa, brindan ventajas en relación a la modulación directa del láser y posibilitan el poder utilizar estaciones de base más sencillas (González, Zibar, caballero, & Monroy, 2010).

Es importante aclarar en este punto que estas conexiones RoF-PM necesitan equiparse con un receptor óptico coherente conjuntamente con bloques de DSP para la recepción y posterior demodulación de las ondas lineales recibidas. El procedimiento de detección coherente en equipos ópticos ha sido probado en la ejecución de demodulación de ondas lineales en la banda de longitudes de onda milimétricas, codificada en la fase de una señal portadora luminosa (Guerrero, Tafur, & Zibar, 2011).

Entre las ventajas más importantes que estos enlaces RoF-PM con detección coherente presentan en relación los del tipo que utiliza IM/DD pueden mencionarse las siguientes:

- 1) Un rango dinámico más amplio de estímulo libre SFDR (*Spur Free Dynamic Range*)
- 2) Una transmisión óptica de información más eficiente en formas avanzadas de modulación
- 3) Permiten un ancho de banda más amplio y mejor selectividad del canal
- 4) Necesita menos energía para la transmisión de la onda.

En conclusión, un receptor coherente soportado en DSP reformata la señal RF enviada a en base a la fase óptica de la señal portadora y después ejecuta la demodulación, en la figura 2.6 se puede observar el diagrama de un equipo como el descrito.

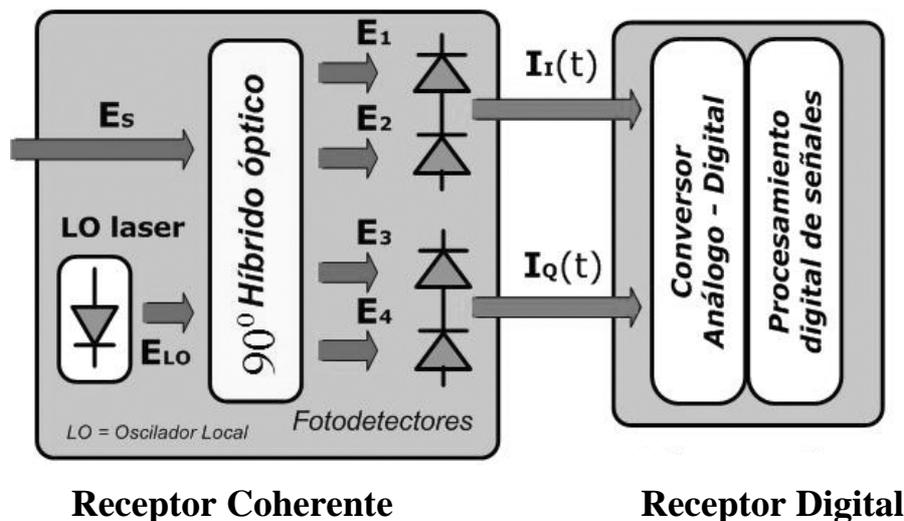


Figura 2. 6 Esquema de un receptor digital coherente para RoF – PM

Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)

De acuerdo a lo indicado anteriormente, puede establecerse que las ventajas más importantes de los receptores digitales coherentes como el mostrado en la figura anterior, en comparación con los convencionales son las siguientes:

- 1) Menor costo y tamaño
- 2) Permiten una compensación adaptativa de las fallas del medio de transmisión mediante métodos PDS (*Plant Design System*).
- 3) Ofrecen gran variabilidad para diseñar y solidez en la ejecución, posibilitando la aplicación de variados modelos empleando el mismo equipamiento en el receptor (Guerrero, Tafur, & Zibar, 2011).

CAPÍTULO 3: DESARROLLO Y TENDENCIA DE LOS SISTEMAS ROF

Como ya se indicó en los párrafos iniciales de este trabajo de investigación aquellos abonados conectados a sistemas cableados o inalámbricos demandan mayores capacidades de información a altas tasas de transmisión. Acorde con estas circunstancias, aparecen con gran fortaleza para atender tales necesidades en las redes de acceso las técnicas FTTH (*Fiber To The Home*) y RoF(Pi, Dong, Chen, & Yu, 2008).

La tendencia en las redes de acceso en la siguiente generación apunta a la integración de los sistemas inalámbricos y cableados para brindar de manera eficiente aplicaciones con un extenso ancho de banda a menor costo. Bajo esta perspectiva, las redes basadas en radio sobre fibra presentan un gran desarrollo en lo referente a accesos en el crecimiento en la capacidad de envío de información y ancho de banda, también la reducción del precio en comparación con los sistemas fijos y móviles, pero su ventaja fundamental es la producción y envío de forma sencilla y segura de ondas a altas tasas de forma cableada o inalámbrica(Lin, y otros, 2007).

Servicios multimedia como HDTV (*High Definition Television*) así como el video en tres dimensiones, han evolucionado de una manera extraordinaria, pero su ejecución requiere un extenso ancho de banda, lo cual no puede ser proporcionado íntegramente por las interfaces existentes para acceder inalámbricamente a estas aplicaciones (Avó, Laurencio, & Medeiros, 2008).

Los factores indicados alientan el avance de servicios inalámbricos con elevadas tasas de transmisión para ofrecer aplicaciones de igual suficiencia que los servicios cableados. De la misma manera, a causa del requerimiento de grandes velocidades se ha producido la saturación de las bandas del espectro electromagnético empleadas en aplicaciones como WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), GSM, Wi-MAX, esto ha impulsado investigaciones para la utilización de nuevas bandas de frecuencia, surge así una renovada disposición por indagar acerca de aspectos relacionados con la producción y envío de ondas milimétricas y microondas (Mohamed, Zhang, Hraimel, & Wu, 2007).

Bajo la norma IEEE802.11a, b y g, en redes WLAN pueden alcanzarse en teoría velocidades de hasta 54Mbps, opciones más avanzadas como UWB (*Ultra Wide Band*),

que comprende aquellas técnicas de radio con anchos de banda superiores a 500 MHz (LeGuenec, y otros, 2009), así también los sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) permiten aumentar la tasa de transmisión en servicios inalámbricos hasta el rango de algunos cientos de Mbps, esperándose llegar a 1Gbps, pero las tasas de transmisión que se acaban de indicar no posibilitan la capacidad de propagar ondas HDTV en tiempo real porque un *streaming* en este tipo de aplicación sin compresión demanda una velocidad de aproximadamente 1,5Gbps (Stöhr, y otros, 2009).

Con las mismas expectativas, se iniciaron las investigaciones acerca de las aplicaciones de radio sobre fibra con longitudes de onda milimétricas desde hace más de veinte años, época en la que no se modulaba la onda milimétrica en la portadora luminosa en el cable de fibra, esto generaba la necesidad de implementar estaciones base más complicadas en lo que respecta a la transformación (Zhang & Wong, 2010).

En aplicaciones de RoF mediante antenas distribuidas se ubica el proceso de la antena en la Oficina Central, ofreciendo opciones adicionales para la implementación de las redes de radio sobre fibra. Esta modificación de la localización de los dispositivos implica que la capacidad es posible redistribuirla a otra ubicación en la red y no ser asentada por el dispositivo instalado en una estación base específica. Bajo el mismo punto referente a las antenas, es importante acotar la importancia para los sistemas de radio sobre fibra respecto a la posibilidad de contar con antenas del tipo RAU (*Remote Antenna Units*), lo cual posibilitaría la operación en diferentes bandas haciendo más sencilla su distribución. Para este aspecto mencionado, otra solución consistiría en aplicar métodos de especificación eficiente de ancho de banda, de tal manera que se asigne en forma dinámica el mismo a los usuarios de acuerdo a sus requerimientos, esto significa que RoF brinda la oportunidad de variar la capacidad establecida, pudiendo cambiar en la trayectoria según el flujo de tráfico y los requerimientos de los abonados (Mitchell, 2009).

En lo referente al extenso ancho de banda que brindan los cables de fibra óptica, es importante precisar ventajas adicionales a la elevada capacidad de envío de microondas, tales como un amplio ancho de banda que posibilita procesar ondas a altas tasas, así se puede filtrar ondas milimétricas realizando la transformación eléctrica-óptica y filtros

ópticos empleados en redes FBG (*Fiber Bragg Grating*) o utilizando el dispositivo MZI (*Mach Zehnder Interferometer*). Pero, independientemente de las ventajas indicadas, es importante reconocer que las ondas milimétricas al propagarse por los cables de fibra sufren atenuación por la dispersión cromática del medio, la cual genera la interferencia ISI (*Intersymbol Interference*) por el ensanchamiento de los pulsos en el receptor (Granada J. , 2010). Esta interferencia es función de las componentes espectrales de la fuente óptica, de la frecuencia de la portadora y de la distancia del enlace de fibra.

Aquellos servicios inalámbricos que operan con ondas milimétricas y anchos de banda superiores a 10GHz pueden brindar capacidades en el orden de los multi-Gbps. Esto podría obtenerse aún con modulaciones sencillas como ASK (*Amplitude-Shift Keying*) o QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*). Tales procesos aparecen como opciones para el acceso óptico o para su utilización en redes *backhaul* móviles, que ayudarían a remediar la congestión en redes con tecnología LTE (*Long Term Evolution*), con las que se alcanzarían tasas 1Gbps (Stohr, 2011).

Se presenta muy importante el estudio de la banda W (75-110GHz), que involucra una ventana de transmisión más extensa, que presenta menores pérdidas en la transmisión y por consiguiente tiene las características adecuadas para operaciones en multi-Gbps(Kuo, y otros, 2010). Aún no se tiene el protocolo para Ethernet en entornos inalámbricos en el rango de 10Gbps, lo cual permitirá la integración de éstos con los servicios cableados para la implementación de accesos con una función de retorno apropiada para redes de telefonía móvil (Stöhr, y otros, 2009).

Resumiendo lo expresado, se puede concluir que es importante la profundización en investigaciones referentes a optimizar la operación de los equipos que trabajan con ondas milimétricas, adecuar estos servicios a la banda frecuencia de trabajo, incrementar la eficacia de los procesos de transformación óptica-eléctrica en los equipos utilizados, así como expandir el rango dinámico de los mismos, nivelar las dispersiones cromáticas que se producen en los cables de fibra y como un resultado de todo lo indicado reducir el precio de este desarrollo (Pinter & Fernando, 2010), (Capmany & Novak, 2007). Al ocurrir la evolución tecnológica de los dispositivos que permita

alcanzar los resultados que se acaban de describir, los sistemas de radio sobre fibra serán más flexibles y seguros, de tal manera que brindarán una topología capaz de atender múltiples aplicaciones y protocolos de radiocomunicación, con estaciones base más sencillas.

3.1 EQUIPAMIENTO Y TECNICAS APLICADAS EN RoF

En esta sección se describirá el equipamiento de los sistemas RoF y las técnicas aplicadas en su operación.

3.1.1 EQUIPAMIENTO EN SISTEMAS RoF

En definitiva, como en cualquier sistema de telecomunicaciones, en la tecnología de radio sobre fibra el equipamiento constituye un factor primordial, pues son estos los encargados de la modulación, supervisión y recepción de las ondas en rangos de frecuencias elevados. La historia de la electrónica detalla los avances alcanzados a partir de la creación del primer semiconductor láser, en el caso de la investigación propia de este trabajo, el interés se basa en los dispositivos láser para ejecutar la modulación directa con anchos de banda en el rango de las microondas y de las ondas milimétricas.

Así aparecen en este entorno servicios de radio sobre fibra que operan con dispositivos láser contruidos con diodos DFB (*Distributed Feedback Laser*), con su angosto ancho espectral, ruido reducido y gran linealidad. En la Universidad de California se efectuaron investigaciones con una frecuencia de resonancia de 72GHz en un equipo láser DFB(Lau, Sung, & Wu, 2006).Bajo las mismas características de efectuaron pruebas a 50GHz en equipos láser VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) (Chrostowski, y otros, 2005), estos dispositivos son muy utilizados en modulación directa de servicios de radio sobre fibra por ser económicos y capaces de operar en tasas del orden de los multi-Gbps con cables de fibra multimodo y longitudes de onda de 850nm y 1300nm (Pérez, 2009).

En los casos de los servicios de radio sobre fibra que emplean modulación MZM, en las pruebas efectuadas se lograron propagaciones con tasas de 14Gbps operando con

portadoras de 60GHz para cortos alcances(Jiang, y otros, 2010). De manera independiente se realizaron otras pruebas con modulaciones BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) y ASK utilizando portadoras de 40GHz (Chen, Lin, & Ye, 2009). Para los tipos de modulación anotados aparece la no linealidad del MZM como una importante limitación(Yang, Zeng, Zheng, & Jung, 2008).

Continuando con el detalle de las exploraciones y pruebas realizadas en temas relacionados con este trabajo de investigación, a continuación se mencionará la demostración efectuada de manera experimental de la operación de un *transceiver* fotónico, esta prueba se realizó en función de la modulación de fase de un emisor de luz con amplio ancho espectral que transmitía ondas de radio sobre fibra óptica monomodo en una trayectoria de más de 20Km(Grassi, Mora, Ortega, & Capmany, 2010). En cambio otros investigadores trabajaron con un convertidor óptico para la transformación de información con una tasa de 1Gbps en banda base a onda milimétrica de 40GHz (Chang, Li, Zhang, Qiu, & Su, 2009). Estos resultados de las experimentaciones que se han detallado, permiten conocer los esfuerzos desplegados por investigadores en este campo, lo cual permite superar una de las limitaciones que enfrentaban los servicios de radio sobre fibra, pues los convertidores mencionados son económicos y pequeños, por lo tanto son excelentes para servicios altamente compuestos.

En lo que se refiere a la distancia de la trayectoria de los enlaces, se puede mencionar que para tramos pequeños se ha informado la implementación de un transmisor para servicios de radio sobre fibra sin requerir amplificadores de radiofrecuencia, alcanzándose en las pruebas propagaciones a 12,5Gbps en el aire con alcances de 3,1m y una sensibilidad de recepción de -45.4 dBm (Weiss, Huchard, Stohr, & Charbonnier, 2008). En casos de mayores alcances se efectuaron pruebas empleando amplificadores eléctricos en el equipo emisor de radio sobre fibra operando a 7,5Gbps en una trayectoria con línea de vista de 36m.

3.1.2 RANGOS DE TRANSMISIÓN OBTENIDOS EN RoF

Anteriormente ya se mencionó las características de la banda W del espectro electromagnético, en la cual se estima que operarán las redes en el futuro (Lucente, y otros, 2011), en este rango de frecuencias deben considerarse por la importancia de sus efectos la dispersión cromática de la fibra, razón por la cual en técnicas como SCM(*Subcarrier Multiplexing*) se observan inconvenientes en estas frecuencias. Otras investigaciones han mostrado técnicas para producir ondas milimétricas para conexiones de subida y de bajada sin que se produzca una gran atenuación y plantean la implementación de un servicio de acceso con tecnología radio sobre fibra a 60GHz con una tasa de 1Gbps empleando una técnica heterodina (Taniguchi, Sakurai, Kimura, & Kumozaki, 2009).

Continuando con este tema, a continuación se presentan las investigaciones correspondientes a servicios con frecuencias menores en las que se ha conseguido remediar las consecuencias de las dispersiones en la fibra, como en el caso de una red WiMax, en la cual se recorren trayectorias de 410Km en fibras monomodo utilizando fibras compensadoras para la dispersión fabricadas a partir de FBG y en el mismo tipo de red, a 3.5GHz los alcances únicamente llegan a 180Km (Al-Noor, Loo, & Comley, 2010) y operando sobre la misma clase de red aplican multiplexación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), con lo cual se alcanzan trayectorias de 792Km a tasas de 120Mbps (Al-Noor, M.; Loo, Kok-Keong; Comley, R., 2010).

Otros investigadores también han utilizado OFDM para alcanzar propagaciones de 16Gbps en trayectorias que llegan a más de 20Km en cable de fibra y 6m en el espacio libre a frecuencias de 24GHz (Yu, y otros, 2008).

Los resultados presentados de las investigaciones realizadas, permiten vislumbrar que el alcance de propagación de ondas milimétricas aparece muy restringido por la atenuación de la energía, debido a las características de los materiales de fabricación de los cables de fibra óptica, lo cual produce la dispersión cromática en el trayecto (Pi, Dong, Chen, & Yu, 2008).

En investigaciones realizadas para analizar el efecto de la dispersión cromática en la propagación de ondas de radiofrecuencia a frecuencias de 64GHz y tasas de transmisión

de 2.5Gbps demuestran que la restricción en el alcance de la propagación aplicando modulación OCS (*Optical Carrier Supression*) permite trayectorias de 34Km y empleando técnicas de OSSB+C (*Optical Single Sideband with Carrier*), se alcanzan resultados experimentales de alcances obtenidos de 95Km, sin atenuación de la onda a causa de la dispersión en ninguno de los dos casos analizados (Mitchell, 2009).

En otras líneas de modulación también se han realizado investigaciones sobre servicios de radio sobre fibra, así por ejemplo para una frecuencia de 60GHz, aplicando técnicas de modulación ASK y QPSK produjeron deducciones en sus experimentos que muestran que este procedimiento tolera la dispersión cromática en los cables de fibra óptica a causa de la espontánea modulación SSB(*Single Side Band*) que se produce al mismo tiempo, debido a la introducción de bloqueo del dispositivo láser VCSEL, como puede observarse en la figura 3.1(Ng'Oma, y otros, 2010)

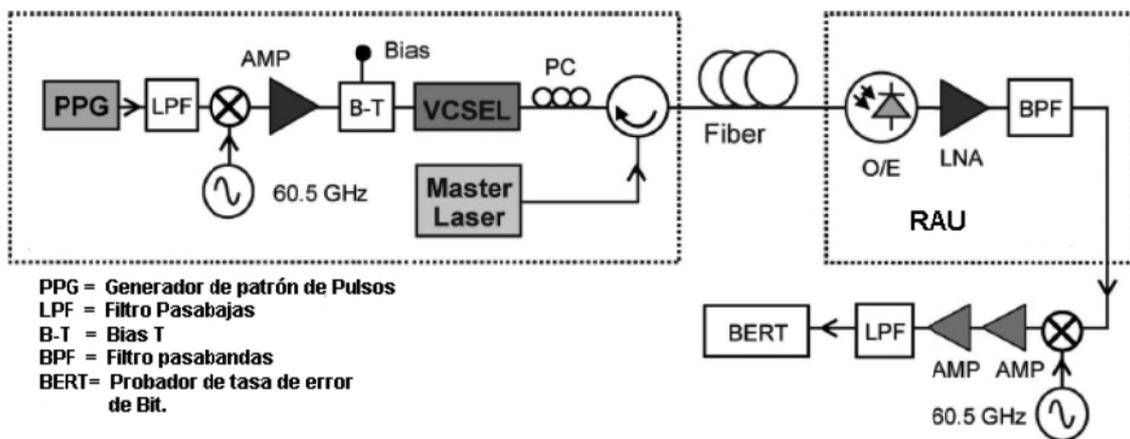


Figura 3. 1 Esquema del experimento realizado con VCSEL a frecuencia de 60GHz

Fuente: (Yang, Zeng, Zheng, & Jung, 2008)

Para aclarar las características del experimento descrito, puede mencionarse que al producirse la modulación SSB se excluye la banda que lleva la portadora y la otra banda lateral que se considera redundante porque las dos bandas poseen la misma información, este procedimiento mejora la técnica de modulación realizad debido a que produce un ahorro de potencia, lo cual posibilita alcanzar mayores trayectorias de propagación, como en el experimento anterior que llegó a 20Km a una frecuencia de 2Gbps.

Continuando con sus experimentos, Marco Lucente y sus colegas, implementan un servicio de radio sobre fibra con una onda portadora milimétrica para modulación

DSBSC (*Double Side Band Suppressed Carrier*) para amplitud empleando OOK (*On Off Keying*) en propagaciones internas produciendo una BER (*Bit Error Ratio*) de 10^{-9} a una distancia de 3,1m (Lucente, y otros, 2011).

Otras investigaciones referentes al desempeño de las propagaciones en frecuencias de 60GHz con tasas de 4Gbps, demostraron la posibilidad de subsanar las consecuencias de la dispersión cromática en los cables de fibra óptica mediante técnicas de equalización *feed-forward*. También comprobaron la utilización de servicios de radio sobre fibra para emisiones con modulación QPSK a una frecuencia de 60 GHz y una tasa de 7Gbps (Ng'Oma, A.; Sauer, M., 2009).

Neil Guerrero conjuntamente con otros investigadores realizaron estudios para la elaboración de un algoritmo *k-means* para aplicaciones en receptores que operan con DSP (Guerrero, Tafur, & Zibar, 2011). Este algoritmo es menos complicado que otros que necesitan más datos estadísticos y posibilita recobrar la onda portadora en cualquier tipo de modulación y calcula la variación de fase producida. Otras ventajas del *k-means* se presentan en relación a la suma de módulos digitales colocados en paralelo sin necesitar más energía.

Otros investigadores han informado los resultados alcanzados en una propagación experimental realizada con una frecuencia de 40GHz a una velocidad de 4Gbps en sistemas RoF-PM utilizando detección coherente empleando DSP (Caballero, Zibar, & Tafur, 2010). En una investigación independiente, se informa acerca de la propagación a 12.5Gbps empleando tres canales aplicando WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) a un sistema de radio sobre fibra a 6GHz y un alcance de 78.8Km (González, Zibar, caballero, & Monroy, 2010).

La utilización de métodos de modulación MSM (*Multiple Subcarrier Modulation*) en servicios de radio sobre fibra, brinda flexibilidad, permite emplear FDM (*Frequency Division Multiplexing*) asíncrona conjuntamente con transferencia multicanal para WLAN, conservando la sencillez de la demodulación directa, esta aplicación con algunas subportadoras de banda angosta permitiría reducir la interferencia inter símbolos en estos canales multitrayectoria, siendo su limitación la poca eficacia de su

energía luminosa, las pruebas documentadas se realizaron a velocidades de 100Mbps (Joshi, Green, & Lesson, 2008).

A continuación se presentan dos investigaciones realizadas en el campo de los servicios de radio sobre fibra: el primero de ellos se refiere a un servicio de radio sobre fibra *full-duplex* a una frecuencia de 60GHz empleando demodulación directa en el rango de los gigabit Ethernet (Park, Yeo, & Ong, 2009), en la segunda investigación se trata acerca de un servicio *full-duplex*, que presenta un buen rendimiento en cable de fibra hasta un alcance de 25Km, en el que el flujo ascendente emplea modulación PSK a una tasa de 100Mbps mientras que el descendente aplica modulación 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) a una frecuencia de 6GHz(Ji, Kim, & Chung, 2009).

En la figura 3.2 se puede observar el diseño de propagación en función del empleo de multiplexación por división de longitud de onda, permite ampliar el potencial del servicio a causa de la introducción de algunas ondas con distinta longitud de onda al mismo tiempo por la fibra, haciendo más flexible la red. (Dadrasnia & Adikan, 2010).

Este tipo de servicios sufre la desventaja de estar condicionado debido a las no linealidades del cable de fibra óptica al producirse el incremento de la energía luminosa o se introducen demasiados canales en el cable de fibra, siendo también importante considerar el impacto que produce la eliminación de la portadora y las no linealidades que también presentan los amplificadores ópticos(Pérez, 2009).

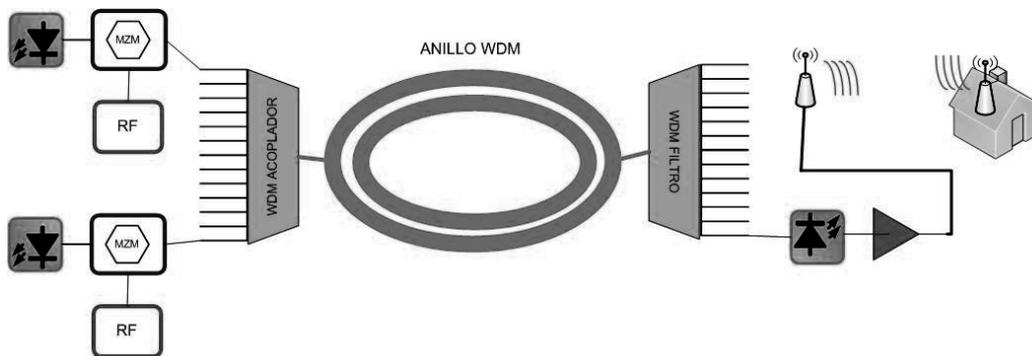


Figura 3. 2 Esquema de un Sistema RoF que emplea transporte óptico WDM

Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)

3.2 REDES CONVERGENTES EN LA TECNOLOGÍA RADIO SOBRE FIBRA

Se denominan NGN (*Next Generation Network*) aquellas redes que brindan diversas aplicaciones en una plataforma única. En terminología técnica, esto quiere decir que la topología de estas redes posibilita el envío de diversas señales, con variados formatos y brindar muchas aplicaciones al mismo tiempo. La tendencia actual vislumbra a los sistemas de radio sobre fibra como una alternativa para permitir la introducción de las redes NGN (Baluja, Echeverria, & Anías, 2010) (Mohapatra, 2009).

En el artículo “*A Radio-over-Fiber System for Simultaneous Generation of Wired and Wireless Services*” (Pi, Dong, Chen, & Yu, 2008), sus autores plantean un proyecto con tecnología RoF que permite una buena ejecución trabajo para un alcance de hasta 50 km a una frecuencia de 20 GHz, para la propagación de ondas de radiofrecuencia moduladas con tecnología PSK (*Phase Shift Keying*) y utilizando ondas en BB (Banda Base) al mismo tiempo, operando con velocidades de propagación de 622 Mbps y 2,5 Gbps. Esta distribución publicada permite que las BS sean más sencillas y también posibilita aminorar el precio del proyecto.

Bajo las mismas premisas P. Gamage con otros colegas, proponen en el artículo “*Experimental Demonstration of the Transport of Digitized Multiple Wireless Systems Over Fiber*” (Gamage, Nirmalathas, Lim, Novak, & Waterhouse, 2009), la propagación simultánea de ondas del tipo WiMax a una frecuencia de 2,5 GHz y otras GSM a 1,95GHz empleando un formato de radiofrecuencia digitalizado con un alcance de más de 20 km con una tasa de transmisión de 48 Mbps y 270 Kbps.

Durante algunos años se han ejecutado algunos experimentos prácticos aplicado principios teóricos de propagación de ondas BB multigigabit simultáneamente con otras de radiofrecuencia empleando el modulador EAM para la transformación de las señales eléctricas a señales ópticas en la banda de frecuencias de 60GHz (Kamisaka, Kuri, & Kitayama, 2001). Los mismos autores presentan en el artículo mencionado la experimentación referente a la propagación de dos señales RoF y BB mediante un modulador EAM consiguiendo una BER inferior a 10^{-9} , en esta investigación se emitió a una velocidad de 9.95328Gb/s las ondas en BB se transmitió a y a una tasa de

transmisión de 155.52Mb/s empleando DPSK (*Differential Phase Shift Keying*). De la misma manera produjeron una investigación alcanzando una BER de 10^{-9} empleando una topología innovadora para radio sobre fibra trabajando con WDM (Yong-Yuk, Hyun-Seung, Yong-Hwan, & Sang-Kook, 2010) utilizando una onda en BB con una velocidad de transmisión de 1.25 Gbps alcanzando una distancia de 23 km, en este experimento se produjo una onda MMW a una frecuencia de 63 Ghz empleando el resultado de una portadora óptica suprimida, así como direccionamiento de banda lateral. Estos investigadores demostraron que este podrá considerarse un buen ejemplo de un sistema WDM-RoF para propagación simultánea de ondas por cable e inalámbricas.

También se han efectuado pruebas utilizando métodos de detección heterodina aplicados a ondas PSK con tasas de transmisión de 2.5 Gbps y ondas ASK inalámbricas, donde los dos tipos de señales operan a una frecuencia de 15 GHz (Yin, y otros, 2009), acerca de lo cual estos investigadores determinaron que es posible efectuar emisiones empleando polarizaciones inalámbricas variadas y de la misma manera poder hacer más sencillas en gran manera la distribución de las BS.

A continuación, en la tabla 3.1 se presenta de una manera detallada un listado de dispositivos con la especificación de los avances logrados al ser aplicados en pruebas realizadas en sistemas de radio sobre fibra, así como la indicación de la referencia de los autores de tales pruebas.

Tabla 3. 1 Avances conseguidos con dispositivos en tecnología RoF en los últimos cinco años.
Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)
Elaborada por el Autor

Dispositivos	Características técnicas
Generación óptica RF	Frecuencias hasta 40GHz usando MZM en cascada (Chen, Lin, & Ye, 2009)
Transceptor fotónico PM-RoF	Distancias hasta 20Km empleando SMF (<i>Single Mode Fiber</i>) (Grassi, Mora, Ortega, & Capmany, 2010)
Convertidores ópticos	Velocidad de 1Gbps en BB con longitudes de onda MMW y frecuencias de 40GHz (Chang, Li, Zhang, Qiu,

	& Su, 2009)
Amplificador CMOS de bajo ruido	Frecuencia de 60GHz (Kunze, Weyers, Mayr, Bilgic, & Hausner, 2009)

Ahora, en la tabla 3.2 se detallará algunos sistemas de radio sobre fibra, así como las técnicas empleadas y los resultados logrados al ser aplicados en investigaciones, así como la indicación de la referencia de los autores de tales trabajos.

Tabla 3. 2 Avances conseguidos con sistemas de tecnología RoF en los últimos cinco años.
Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)
Elaborada por el Autor

Sistemas RoF	Características técnicas
RoF a frecuencia de 60GHz y velocidad de 1Gbps	Emplean técnica heterodina óptica (Taniguchi, Sakurai, Kimura, & Kumozaki, 2009)
WiMax a 3,5GHz	Distancias hasta 410Km empleando FBG (Al-Noor, Loo, & Comley, 2010)
WiMax con OFDM	Alcances hasta 792Km a una velocidad de 120Mbps (Al-Noor, M.; Loo, Kok-Keong; Comley, R., 2010)
RoF a frecuencia de 64GHz y velocidad de 2,5Gbps	Empleando OCS en distancias de hasta 34Km (Mitchell, 2009)
RoF a frecuencia de 64GHz y velocidad de 2,5Gbps	Empleando OSSB+C en distancias de hasta 95Km (Mitchell, 2009)
RoF laser VCSEL	Frecuencia de 60GHz, velocidad de 2Gbps empleando QPSK y ASK con BLU (Banda Lateral Única) alcances de hasta 20 km (Ng'Oma, y otros, 2010)
Frecuencia de 60GHz y velocidad de 4Gbps	Empleando ecualización Feed-Forward (Ng'Oma, A.; Sauer, M., 2009)
Frecuencia de 60GHz y velocidad de 7Gbps	Empleando modulación QPSK (Ng'Oma, A.; Sauer, M., 2009)
RoF-PM a frecuencia de 40GHz y velocidad de 4Gbps	Sistema con detección coherente basado en DSP (Caballero, Zibar, & Tafur, 2010)

WDM-RoF	Sistema de 3x12,5Gbps a frecuencia de 6GHz y alcances de hasta 78,8Km (Guerrero, Tafur, & Zibar, 2011)
RoF full dúplex	Frecuencia de 60 GHz en GbE (Gigabit Ethernet)empleando DD (<i>Direct Detection</i>) (Ji, Kim, & Chung, 2009)
RoF a frecuencia de 6GHz full dúplex	Modulación 16-QAM y velocidad de 200Mbps descendente, modulación PSK y velocidad de 100Mbps descendente empleando hasta 25 km de fibra óptica (Ji, Kim, & Chung, 2009)

Finalmente, en la tabla 3.3 se presenta un resumen detallado de las Redes Convergentes RoF, los sistemas y técnicas utilizadas, sus características técnicas y la referencia de los investigadores que participaron en estas pruebas y alcanzaron los avances que se indican en este detalle.

Tabla 3. 3 Avances conseguidos con Redes Convergentes RoF en los últimos cinco años. Fuente: (Granada, Serpa, Varón, & Guerrero, 2011)
Elaborada por el Autor

Sistemas RoF	Características técnicas
WiMax y GSM sobre cables de fibra óptica	Velocidades de 48Mbps y 270Kbps y alcances de hasta 20Km (Gamage, Nirmalathas, Lim, Novak, & Waterhouse, 2009)
Transmisión simultánea de señales	Señales BB a una velocidad de 1.25Gbps y de RF a una frecuencia de 63GHz empleando WDM (Yong-Yuk, Hyun-Seung, Yong-Hwan, & Sang-Kook, 2010)
Transmisión simultánea de señales	Empleando PSK a una velocidad de 2.5Gbps y con ASK a una frecuencia de 15GHz (Yin, y otros, 2009)

3.3 RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

La revisión de la bibliografía existente acerca de la tecnología de radio sobre fibra, ha permitido obtener y poder presentar una investigación de las etapas de desarrollo de

estos sistemas a través de un recuento de los trabajos y pruebas realizados por expertos investigadores en cada una de las áreas que participan en la implementación de la tecnología RoF en sistemas de comunicaciones.

Dentro de este esquema se han mencionado a lo largo de este trabajo de investigación los dispositivos más importantes utilizados en la tecnología RoF, indicando sus características fundamentales y los avances alcanzados en las pruebas realizadas por diversos investigadores que han experimentado con ellos en diferentes arquitecturas de redes y sistemas que aplican la tecnología de radio sobre fibra.

Los resultados alcanzados en las investigaciones realizadas permiten vislumbrar a la tecnología de radio sobre fibra como una excelente opción para la implementación de redes y sistemas de telecomunicaciones modernos que buscan como tendencia la unificación y la convergencia de las aplicaciones y servicios que se brindan a los usuarios.

También se han indicado en este trabajo los desafíos más importantes que será necesario resolver para continuar con el proceso evolutivo de los sistemas basados en tecnología radio sobre fibra, especialmente en aquellos que emplean la banda correspondiente a las longitudes de onda MWM. Entre los aspectos más importantes que deben resolverse se puede mencionar la necesidad de simplificar los dispositivos que se emplean, disminuir los gastos que la implementación de estos sistemas representan, establecer una solución que permita disminuir o recuperar las fuertes pérdidas que se producen en el tramo de la transmisión inalámbrica, además en la etapa correspondiente a la propagación a través de los cables de fibra óptica debe trabajarse en lo relativo a las características propias de este medio de transmisión, tales como la atenuación que se presenta y la dispersión, especialmente la cromática.

Sin embargo, para lograr superar algunos de estos retos aún se requerirán experimentaciones adicionales y nuevos trabajos de investigación que permitan alcanzar nuevos descubrimientos y avances tecnológicos que permitan la continua evolución de los sistemas de radio.

Bajo esta perspectiva se presentan algunos campos propicios para su exploración, entre ellos es posible mencionar el desarrollo de los equipos y aparatos usados en esta tecnología, los cuales deben trabajar por supuesto a frecuencias elevadas de tal manera que sea posible alcanzar propagaciones de mayor alcance, también deben cumplir con características técnicas tales que permitan que las transmisiones realizadas a través de los cables de fibra óptica presenten pérdidas lo menores posibles y el mismo comportamiento se espera que ocurra en la etapa de transmisión inalámbrica.

Dentro de este ámbito de investigación que se acaba de mencionar, aparece como uno de los más novedosos y al cual se han dirigido los esfuerzos de los investigadores, es el desarrollo de los receptores digitales que utilicen detección coherente, es decir que en el proceso de recepción se utiliza la información que se tiene de la fase de la señal portadora para demodular las ondas recibidas, en este caso las investigaciones se realizan empleando métodos soportados en DSP que permitan compensar la distorsión que se produce durante la propagación de las ondas. Entre los tipos de modulación y demodulación coherente se tiene: PSK, FSK (*Frequency Shift Keying*), ASK, CPM (*Continuous Phase Modulation*) y los sistemas híbridos.

Aunque desde el punto de vista ideal, el perfeccionamiento de estos equipos no debe depender del tipo de modulación que se aplique, es evidente que esto permite facilitar los procesos de propagación y restablecimiento de las ondas mezcladas en un solo medio y de la misma manera también colabora con la necesidad de convergencia de aplicaciones en los sistemas de radio sobre fibra que por su naturaleza de prestación deben llevar diversidad de servicios.

En este trabajo de investigación durante la fundamentación teórica realizada mediante la lectura de la bibliografía adecuada y orientada a esta tecnología, se observó la consecución práctica de métodos RoF-PM que emplean modulación coherente soportada en DSP, RoF-SCM, RoF-WDM, WiMAX y GSM al propagarse las ondas en los cables de fibra óptica, estos procedimientos constituyen el fundamento para el avance de las redes NGN.

Las investigaciones que se realicen en este ámbito revisten gran importancia para las telecomunicaciones en el Ecuador, considerando las políticas gubernamentales en el campo social y específicamente con el progreso en el desarrollo de los pueblos que permite la aplicación de las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación), puesto que sistemas como RoF facilitan el transporte y acceso de las redes informáticas a todos los rincones del país donde actualmente no poseen este tipo de servicio.

En el Ecuador el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, se encarga de controlar el desarrollo de las TIC, dentro de esta especificación se incluyen las telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico, el cual entre sus objetivos fundamentales tiene la responsabilidad implementar operaciones de soporte para garantizar el acceso igualitario a los servicios de telecomunicaciones para el desarrollo de la Sociedad de la Información, de acuerdo a lo establecido en el Plan Nacional para el Buen Vivir propulsado por el gobierno ecuatoriano (Senplades, 2013).

El tercer objetivo de este ministerio busca precisamente promoverla investigación científica y tecnológica en materia de las TIC, para el progreso de la Sociedad de la Información y del Conocimiento. De igual manera el quinto objetivo establece como responsabilidad de este ministerio el impulso de la utilización de Internet y de las TIC (Senplades, 2013).

El gobierno ecuatoriano considera entre los bienes estratégicos, es decir aquellos que atañen a los sectores productivos y la utilización de los recursos naturales, a las telecomunicaciones y el espectro electromagnético, como ejes fundamentales para la aplicación y metas de la nueva matriz productiva que impulsa el régimen (Senplades, 2013).

Los aspectos mencionados deben ser considerados como oportunidades en el ámbito de la investigación para profundizar en el desarrollo de nuevas tecnologías que puedan ser implementadas en el Ecuador y que permitan facilitar el acceso de la mayor parte de la población a los servicios de telecomunicaciones, entre las tecnologías que cumplen tales expectativas aparece con una caracterización muy importante el transporte de información a través de los sistemas de radio sobre fibra óptica.

El Diario El Telégrafo en su edición del 9 de Julio de 2014, informa que en el Ecuador están instalados 35.111Km de cable de fibra óptica, pertenecientes a la CNT (Corporación Nacional de Telecomunicaciones), cifra alcanzada gracias a la aplicación del Plan Nacional de Banda Ancha, que busca el despliegue de redes de acceso de banda ancha a través de fibra óptica para que la tecnología llegue a toda la población ecuatoriana y de esta manera reducir la brecha digital (Economía, 2014). En lo relativo a la tecnología RoF, este avance en el montaje de cables de fibra óptica constituye una gran fortaleza para la implementación de la misma, puesto que se podría contar próximamente con técnicas inalámbricas de banda ancha propagándose a través de las redes de fibra óptica, alternativa que permitiría optimizar la utilización de este medio de transmisión y aumentar el acceso a los servicios informáticos y de telecomunicaciones en general a la población ecuatoriana.

CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo de investigación se ha conseguido cumplir con los objetivos específicos planteados para el desarrollo del mismo, de acuerdo al siguiente detalle:

Se ha presentado en el transcurso de esta investigación el estado actual de la tecnología RoF.

Se ha realizado una evaluación del desempeño de esta tecnología, sus ventajas y limitaciones, constatándose las consecuencias de la dispersión cromática de los cables ópticos al transportar ondas a altas frecuencias, en cuyo caso se produce el desplazamiento de fase y una demora en el tiempo de arribo de la onda al detector, ocasionando un ensanche de la forma de onda receptada y probablemente pérdida de información.

Se ha analizado las tendencias en el desarrollo de esta tecnología.

Se ha realizado la verificación de la viabilidad de su utilización en la implementación de redes de telecomunicaciones, al demostrarse que los sistemas de radio sobre fibra aportan una gran capacidad, además de una gran versatilidad y escalabilidad. Tales características posibilitarán una mejor combinación de redes alámbricas e inalámbricas, beneficiando de esta manera a los abonados que podrán contar con aplicaciones de mucha calidad a precios económicos.

De acuerdo a lo expresado y a partir del cumplimiento de los objetivos específicos, se ha alcanzado el cumplimiento del objetivo general que se planteó ante esta investigación y que consiste en desarrollar una investigación acerca de la tecnología de radio sobre fibra óptica (RoF) y demostrar la viabilidad de su utilización en la implementación de redes de telecomunicaciones.

RECOMENDACIONES

En el transcurso de la investigación se mencionó la atenuación que ocurre cuando los alcances de la transmisión superan los 50Km, se podría reducir los efectos de este inconveniente mediante amplificadores ópticos (uno o más de acuerdo a la distancia), lo recomendable sería el uso de amplificadores de fibra monomodo EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), los cuales en la ventana de 1550nm presentan características óptimas.

Los amplificadores de fibra monomodo EDFA ofrecen características que permiten su utilización en sistemas con multiplexación WDM.

La distorsión del pulso óptico en alcances superiores a 50Km, puede reducirse utilizando fases de ecualización óptica o mediante moduladores MZMconectados en cascada para la transformación eléctrica-óptica.

GLOSARIO

APD:	<i>Avalanche Photodiode</i>
ASK:	<i>Amplitude-Shift Keying</i>
BB:	Banda Base
BER:	<i>Bit Error Ratio</i>
BLU:	Banda Lateral Única
BPSK:	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS:	<i>Base Station</i>
CNR:	<i>Carrier to Noise Ratio</i>
CNT:	Corporación Nacional de Telecomunicaciones
CNT-EP:	Corporación Nacional de Telecomunicaciones – Empresa Pública
CO:	<i>Central Office</i>
CPM:	<i>Continuous Phase Modulation</i>
CS:	<i>Control Station</i>
DAS:	<i>Distributed Antennas System</i>
DD:	<i>Direct Detection</i>
DFB:	<i>Distributed Feedback Laser</i>
DPSK:	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
DSBSC:	<i>Double Side Band Suppressed Carrier</i>
DSP:	<i>Digital Signal Processing</i>
EAM:	<i>Electro-Absortion Modulator</i>
EDFA:	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EHF:	<i>Extremely High Frequency</i>
FBG:	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FDM:	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FSK:	<i>Frecuency Shift Keying</i>
FTTH:	<i>Fiber To The Home</i>
GbE:	Gigabit Ethernet
GPRS:	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM:	<i>Global System for Mobile communications</i>
HDTV:	<i>High Definition Television</i>
HFC:	<i>Hybrid Fibre Coaxial</i>
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

ILD:	<i>Injection Láser Diode</i>
IM/DD:	<i>Intensity Modulated Direct Detection</i>
IP:	<i>Internet Protocol</i>
ISI:	<i>Intersymbol Interference</i>
ITU:	<i>International Telecommunication Union</i>
LED:	<i>Light-Emitting Diode</i>
LTE:	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO:	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MMW:	<i>Millimeter Wave</i>
MSM:	<i>Multiple Subcarrier Modulation</i>
MZI:	<i>Mach Zehnder Interferometer</i>
MZM:	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NGN:	<i>Next Generation Network</i>
OCS:	<i>Optical Carrier Supression</i>
OFDM:	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OOK:	<i>On Off Keying</i>
OSSB+C:	<i>Optical Single Sideband with Carrier</i>
PDS:	<i>Plant Design System</i>
PIN:	<i>Positive Intrinsic Negative photodiodes</i>
PM:	<i>Phase Modulation</i>
PMD:	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PSK:	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM:	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS:	<i>Quality of Service</i>
QPSK:	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RAU:	<i>Remote Antenna Units</i>
RF:	<i>Radiofrecuencia</i>
RoF:	<i>Radio over Fiber</i>
SCM:	<i>Subcarrier Multiplexing</i>
SFDR:	<i>Spur Free Dynamic Range</i>
SMF:	<i>Single Mode Fiber</i>
SRS:	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
SSB:	<i>Single Side Band</i>

TIC:	Tecnologías de la Información y Comunicación
UMTS:	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UWB:	<i>Ultra Wide Band</i>
VCSEL:	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i>
WCDMA:	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDM:	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WiMAX:	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN:	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN:	<i>Wireless Personal Area Networks</i>

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Al-Noor, M., Loo, J., & Comley, R. (2010). WiMAX 54Mbit/s over radio over fibre using DCF, SMF fibre and FGB for fibre over 410km. *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), 2010 7th* , 829-833.

Al-Noor, M.; Loo, Kok-Keong; Comley, R. (2010). 120 Mbps Mobile WiMAX Scalable OFDMA Signal Transmission over RoF with SMF, DCF and Chirped FBG for Fibre Length of 792 km. *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC), 2010 6th*, 373-377.

Avó, R., Laurencio, P., & Medeiros, M. (2008). Simulation of mm-wave over fiber employing optical single sideband modulation combined with subcarrier multiplexing. *2nd ICTON Mediterranean Winter, 2008. ICTON-MW 2008.* , 1-5.

Baluja, W., Echeverria, J., & Anías, C. (2010). Experiences in Planning and Implantation of Security at Next Generation Networks. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* , 703-707.

Bordallo, L. (11 de Noviembre de 2012). *Fibra óptica*. Obtenido de [http://es.slideshare.net/](http://es.slideshare.net/luisbordallo9/fibra-ptica-1): <http://es.slideshare.net/luisbordallo9/fibra-ptica-1>

Caballero, A., Zibar, D., & Tafur, I. (2010). Digital coherent detection of multi-gigabit 40 GHz carrier frequency radio-over-fibre signals using photonic downconversion. *Electronics Letters*, 57-58.

Campos, G., & Sabogal, G. (2006). Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica. *Umbral Científico*, 76-84.

Capmany, J., & Novak, D. (2007). Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 319-330.

Cardona, J., & Fernández, L. (2009). *Estudio de técnicas de modulación para enlaces ópticos*. Castelldefels: Universidad Politécnica de Cataluña.

Celada, D. (22 de Octubre de 2012). *Sistemas de radio sobre fibra óptica*. Obtenido de Prezi: <http://prezi.com/kqpi2iwesl69/sistemas-de-radio-sobre-fibra-optica/>

Chang, Q., Li, Q., Zhang, Z., Qiu, M., & Su, Y. (2009). Micrometer-scale optical up-converter using a resonance-split silicon microring resonator in radio over fiber systems. *Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009.* , 1-3.

Chen, H., Lin, R., & Ye, J. (2009). Schemes of generating M-ASK signals and remote local oscillator at millimeter-wave band in Radio over Fiber system. *Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2009 Asia* , 1-6.

Chen, L., Wen, S., Li, Y., He, J., Wen, H., Shao, Y., . . . Pi, Y. (2007). Optical Front-Ends to Generate Optical Millimeter-Wave Signal in Radio-Over-Fiber Systems With Different Architectures. *Journal of Lightwave Technology*, 3381 - 3387.

Chrostowski, L., Zhao, X., Chang-Hasnain, C., Shau, R., Ortsiefer, M., & Amann, M.-C. (2005). 50 GHz directly-modulated injection-locked 1.55 μm VCSELs. *Optical Fiber Communication Conference, 2005. Technical Digest. OFC/NFOEC*.

CUDI. (24 de Octubre de 2013). *Topología de la red CUDI Corporación Universitaria pra el Desarrollo de Internet. México*. Obtenido de <http://www.cudi.mx>: <http://www.cudi.mx/noc-cudi/topologia>

Dadrasnia, E., & Adikan, F. (2010). DWDM effects of single model optical fiber in radio over fiber system. *International Conference on Electronic Computer Technology (ICECT)*, 39-41.

Economía, R. (9 de Julio de 2014). Ecuador tiene 35.111 kilómetros de fibra óptica (Infografía). *El Telégrafo*, pág. Sección Economía.

Fabbri, M., & Faccin, P. (2007). Radio over Fiber Technologies and Systems: New Opportunities. *Transparent Optical Networks*, 230-233.

Gamage, P., Nirmalathas, A., Lim, C., Novak, D., & Waterhouse, R. (2009). Experimental Demonstration of the Transport of Digitized Multiple Wireless Systems Over Fiber. *Photonics Technology Letters, IEEE (Volume:21 , Issue: 11)*, 691-693.

González, N., Zibar, D., caballero, A., & Monroy, I. (2010). Experimental 2.5-Gb/s QPSK WDM Phase-Modulated Radio-Over-Fiber Link With Digital Demodulation by a K -Means Algorithm. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 335-337.

Granada, J. (2010). Compensación de la dispersión cromática usando ecualización LMS. *Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial STSIVA*, 224-229.

Granada, J., Serpa, C., Varón, G., & Guerrero, N. (2011). Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 29(2), 242-265.

Grassi, F., Mora, J., Ortega, B., & Capmany, J. (2010). Radio over fiber transceiver employing phase modulation of an optical broadband source. *Optics Express*, 21750-21756.

Guerrero, N., Tafur, I., & Zibar, D. (2011). *Digital Photonic Receivers for Wireless and Wireline Optical Fiber Transmission Links*. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.

Herschel, R., & Schaffer, C. (2011). Radio-over-Fiber Systems for Next Generation Wireless. *International Students and Young Scientists Workshop*, 54-58.

Jardon, H., & Linares, R. (1995). *Sistemas de comunicaciones por fibras opticas*. Mexico: ALFAOMEGA.

Ji, H.-C., Kim, H., & Chung, Y. (2009). Full-Duplex Radio-Over-Fiber System Using Phase-Modulated Downlink and Intensity-Modulated Uplink. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 9-11.

Jiang, W.-J., Lin, C.-T., Ng'oma, A., Shih, P.-T., Chen, J., Sauer, M., . . . Chi, S. (2010). Simple 14-Gb/s Short-Range Radio-Over-Fiber System Employing a Single-Electrode MZM for 60-GHz Wireless Applications. *Journal of Lightwave Technology*, , 2238-2246.

Joshi, H., Green, R., & Lesson, M. (2008). Multiple sub-carrier optical wireless systems. *10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks, 2008. ICTON 2008.* , 184-188.

Kamisaka, T., Kuri, T., & Kitayama, K. (2001). Simultaneous modulation and fiber-optic transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz-band radio signals on a single wavelength. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, (Volume:49, Issue: 10)*, 2013-2017.

Kim, H. (2005). *Radio over Fiber based Network Architecture*. Berlin: Technischen Universitat Berlin.

Kunze, J., Weyers, C., Mayr, P., Bilgic, A., & Hausner, J. (24 de Septiembre de 2009). *60 GHz compact low noise amplifier in 65 nm CMOS*. Obtenido de <http://digital-library.theiet.org/>: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2009.0518>

Kuo, F., Shi, J., Chiang, H., Chuang, H., Chiou, H., Pan, C., . . . Huang, C. (2010). Spectral Power Enhancement in a 100 GHz Photonic Millimeter-Wave Generator Enabled by Spectral Line-by-Line Pulse Shaping. *Photonics Journal, IEEE*, 719-727.

Lau, E., Sung, H.-K., & Wu, M. (2006). Ultra-high, 72 GHz resonance frequency and 44 GHz bandwidth of injection-locked 1.55- μm DFB lasers. *Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference. OFC 2006*.

Lee, J.-H. (10 de Febrero de 2000). *Analysis and Characterization of Fiber Nonlinearities with Deterministic and Stochastic Signal Sources*. Obtenido de <http://scholar.lib.vt.edu>: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02212000-15440013/unrestricted/jhlee_etd.pdf

LeGuenec, Y., Pizzinat, A., Meyer, S., Charbonnier, B., Lombard, P., Lourdiane, M., . . . Sillans, C. (2009). Low-Cost Transparent Radio Over-Fiber System for In-Building Distribution of UWB Signals. *Journal of Lightwave Technology*, 2649-2657.

Li, X., Mardling, R., & Armstrong, J. (2007). Channel Capacity of IM/DD Optical Communication Systems and of ACO-OFDM. *IEEE International Conference on Communications, 2007. ICC '07.* , 2128-2133.

Lin, C.-T., Chen, J., Peng, P.-C., Peng, C.-F., Peng, W.-R., Chiou, B.-S., & Chi, S. (2007). Hybrid Optical Access Network Integrating Fiber-to-the-Home and Radio-Over-Fiber Systems. *Photonics Technology Letters, IEEE* , 610-612.

Lucente, M., Stallo, C., Rossi, T., Mukherjee, S., Cianca, E., Ruggieri, M., & Dainelli, V. (2011). Analysis and design of a point-to-point radio-link at W band for future satellite telecommunication experiments. *Aerospace Conference, 2011 IEEE*, 1 - 10.

Manfredi, F. (s.f.). *Introducción a la fibra óptica*. Obtenido de https://docs.google.com/https://docs.google.com/document/d/1NO5wmK3xVj04M_p_L9M0Ql5AwmiLH11STb72iQ7P8GM/edit

Milosavljevic, M., Kourtessis, P., Gliwan, A., & Senior, J. (2009). Advanced PON topologies with wireless connectivity. *Transparent Optical Networks*, 1-4.

Mitchell, J. (2009). Radio over fibre networks: Advances and challenges. *Optical Communication*, 1-4.

Mohamed, M., Zhang, X., Hraimel, B., & Wu, K. (2007). Efficient Photonic Generation of Millimeter-Waves Using Optical Frequency Multiplication in Radioover-fiber Systems. *International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2007 IEEE* , 179-182.

Mohapatra, S. (2009). Integrated planning for Next Generation Networks. *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management-Workshops, 2009. IM '09.*, 205-210.

Ng'oma, A. (2005). *Radio-over-Fibre Technology*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

Ng'Oma, A., Fortusini, D., Parekh, D., Yang, W., Sauer, M., Benjamin, S., Hofman, W., Amann, M., Chang-Hasnain, C. (2010). Performance of a

Multi-Gb/s 60 GHz Radio Over Fiber System Employing a Directly Modulated Optically Injection-Locked VCSEL. *Journal of Lightwave Technology*, 2436-2444.

Ng'Oma, A.; Sauer, M. (2009). Radio-over-fiber technologies for high data rate wireless applications. *Sarnoff Symposium, 2009. SARNOFF '09. IEEE*, 1-6.

Park, C., Yeo, Y.-K., & Ong, L. (2009). Full-duplex 60 GHz radio-over-fiber system for gigabit network application. *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE*, 446-447.

Pastor, D., ramos, F., & Capmany, J. (2007). *Sistemas de Comunicaciones Ópticas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Pérez, J. (2009). *Coexistencia e integración de comunicaciones Inalámbricas en Sistemas de Transmisión Ópticos*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Pi, Y., Dong, Z., Chen, L., & Yu, J. (2008). A Radio-over-Fiber System for Simultaneous Generation of Wired and Wireless Services. *SPIE Proceedings 7136, Optical Transmission, Switching, and Subsystems VI*.

Pinter, S., & Fernando, X. (2010). Estimation and equalization of fiber-wireless uplink for multiuser CDMA 4G networks. *Transactions on Communications, IEEE*, 1803-1813.

Rao, L., Sun, X., Li, W., & Huang, D. (2006). OFDM-ROF System and Performance Analysis of Signal Transmission. *2006 Optics Valley of China International Symposium on Optoelectronics*, 67 - 70.

Senplades. (24 de Junio de 2013). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017*. Obtenido de <http://plan.senplades.gob.ec>: <http://plan.senplades.gob.ec/telecomunicaciones-y-sociedad-de-la-informacion>

Sharmaa, V., Singhb, A., & Sharmac, A. (2012). Challenges to radio over fiber (RoF) technology and its mitigation schemes – A review. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 338-342.

Smith, G., Novak, D., & Lim, C. (1998). A millimeter-wave full-duplex WDM/SCM fiber-radio access network. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 18-19.

Stohr, A. (2011). 10 Gbit/s wireless transmission using millimeter-wave over optical fiber systems. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 1-3.

Stöhr, A., Akrou, A., Buß, R., Charbonnier, B., vanDijk, F., Enard, A., . . . Weiß, M. (2009). 60 GHz radio-over-fiber technologies for broadband wireless services. *Journal of Optical Networking*, 471-487.

Taniguchi, T., Sakurai, N., Kimura, H., & Kumozaki, K. (2009). Technical Trends in Millimeter-wave Band Radio-On-Fiber Access System. *PIERS Proceedings, Beijing, China*, 24-27.

Telnet. (Noviembre de 2009). *Fibra óptica para NGN - dispersión cromática y PMD*. Obtenido de www.telnet-ri.es: http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/whitepaper%20-Fibra%20optica%20para%20NGN-dispersion%20cromatica%20y%20PMD-Telnet-RI%20-%20ES.pdf

Telnet. (s.f.). *Anillos ópticos xWDM*. Obtenido de <http://www.telnet-ri.es>: <http://www.telnet-ri.es/soluciones/transporte-sdh-10g-y-xwdm/anillos-opticos-xwdm/>

Urueña, E. (2005). *Cableado Recurso Electrónico*. Obtenido de <http://biblioteca.ulagrancolombia.edu.co>: <http://biblioteca.ulagrancolombia.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=86905>

Weiss, M., Huchard, M., Stohr, A., & Charbonnier, B. (2008). 60-GHz photonic millimeter—wave link for short— to medium-range Wireless transmission pp to 12.5 Gb/s. *Journal of Lightwave Technology*, 2424-2429. Obtenido de IEEEExplore Digital Library.

Yang, H., Zeng, J., Zheng, Y., & Jung, H. (2008). Evaluation of effects of MZM nonlinearity on QAM and OFDM signals in RoF transmitter. *Microwave photonics, 2008. jointly held with the 2008 asia-pacific microwave photonics conference. mwp/apmp 2008. international topical meeting on*, 90-93.

Yin, J., Xu, K., Li, Y., Sun, X., Gui, L., Wu, J., . . . Lin, J. (2009). Demonstration of 2.5Gb/s optical PSK signal and the ASK wireless transmission based on heterodyne detection in a radio-over-fiber platform. *International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2009. MWP '09.*, 1-3.

Yong-Yuk, W., Hyun-Seung, K., Yong-Hwan, S., & Sang-Kook, H. (2010). Full Colorless WDM-Radio Over Fiber Access Network Supporting Simultaneous Transmission of Millimeter-Wave Band and Baseband Gigabit Signals by Sideband Routing. *Journal of Lightwave Technology (Volume:28 , Issue: 16)*, 2213-2218.

Yu, J., Hu, J., Qian, D., Jia, Z., Kung, G., & Wang, T. (2008). Transmission of Microwave-Photonics Generated 16Gbit/s Super Broadband

OFDM Signals in Radio-over-Fiber System. *Optical Fiber Communication Conference*.

Zhang, Y., & Wong, T. (2010). Prospects of CMOS technology for millimeter-wave radio-over-fiber applications. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2010, 476-479.