

# Monitoreo del efecto de la dispersión cromática en un sistema de radio sobre fibra basado en técnicas de procesamiento digital de señales

Jhon James Granada Torres

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial  
Bogotá, Colombia  
2012



# Monitoreo del efecto de la dispersión cromática en un sistema de radio sobre fibra basado en técnicas de procesamiento digital de señales

**Jhon James Granada Torres**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de Telecomunicaciones**

Director:

Ph.D. Neil Guerrero González

Codirectora:

Ph.D. Gloria Magarita Varón Durán

Línea de Investigación:

Comunicaciones Ópticas

Grupo de Investigación: Electrónica de Alta Frecuencia y Comunicaciones (CMUN)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2012



A mis padres

# Agradecimientos

En primer lugar quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a Neil Guerrero, director de esta tesis, por su gran ayuda, su paciencia, sus valiosas ideas y sus excelentes consejos. También quiero agradecer a mi codirectora Margarita Varón y a la profesora Claudia Serpa por la ayuda que me han prestado durante el desarrollo de la tesis, además, al Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín y a la Universidad de Antioquia. Por último, no quiero olvidar a toda la gente, familiares y colegas, que directa o indirectamente han contribuido a la realización de esta tesis. Mi agradecimiento a todos ellos y de forma muy especial a Laura, a mi hermana Karen y a mis padres Leonor y James, mi razón de ser.

## Resumen

En este trabajo se estudian los efectos de la dispersión cromática en un sistema de radio sobre fibra de largo alcance que transmite en la banda de las ondas milimétricas, a partir de modelos realizados en simulación en el software VPI (Virtual photonics instruments) para sistemas con detección directa, y en Matlab para sistemas con detección coherente. Estos modelos transmiten señales de radiofrecuencia a distancias de hasta 80 km. Se hizo un análisis cualitativo de la señal mediante la calidad de los diagramas de ojo y de los espectros ópticos y eléctricos. También se calculó la tasa de error de bit de acuerdo a las variaciones de la relación señal a ruido óptica, mostrando transmisiones aceptables para modulaciones en amplitud hasta los 80 km a 1 Gbps para frecuencias de portadora entre los 60 y 100 GHz, y para transmisiones en BPSK con detección directa se calculó la magnitud del error vectorial mostrando buen desempeño las transmisiones a 155 Mbps en distancias hasta los 100 km a 60 GHz y para 2.5 Gbps hasta los 2 km. Se presentó un novedoso método de estimación de la dispersión cromática usando ajustamiento gaussiano en histogramas asíncronos mediante el algoritmo de máxima esperanza, mostrando que los efectos de la dispersión cromática no incrementan proporcionalmente al aumento de la frecuencia de la portadora ni de la distancia de transmisión y que una pequeña variación en un parámetro de la red puede afectar significativamente la señal recibida.

**Palabras clave:** Dispersión cromática, detección directa, detección coherente, monitoreo óptico, radio sobre fibra.

## Abstract

In this work is studied the chromatic dispersion effects of long-reach Radio-over-Fiber systems in millimeter-wave band through simulations in Virtual Photonics (VPI) for intensity modulation and direct detection systems, and in Matlab for phase modulation and coherent detection systems. Those networks transmits optical signals in radiofrequency to a distance of 80 km. The qualitative analysis of data transmission through the passive optical network is made based on the quality of the eye diagram, and the optical and electrical spectrums. Also, the bit-error rate is calculated according to the optical-to-signal noise ratio to make a quantitative analysis regarding the transmission distance and speed, showing good results in a non-return-to-zero modulation at 80 km, and in BPSK transmissions with direct detection the error vectorial magnitude is estimated presenting good performance in transmissions at 155 Mbps to a distance of 100 km using carrier of 60 GHz, and at 2.5 Gbps to a distance of 2 km. Radio over fiber systems with coherent detection shows better performance. A novel method for chromatic dispersion estimation is presented, using gaussian fitting in asynchronous histograms trough expectation-maximization algorithm, showing that the effects of chromatic dispersion does not increase proportionally to the carrier frequency, or the transmission distance and that a small change in one parameter of the network may vary significantly the effect produced in the received signal.

**Keywords:** chromatic dispersion, coherent detection, direct detection, optical performance monitoring, radio-over-fiber.

---

## Producción bibliográfica de la tesis

### En eventos

- **Jhon James Granada Torres**, Margarita Varón D., Neil Guerrero G., "Chromatic dispersion effects in a radio over fiber system with PSK modulation and coherent detection", IEEE Colombian Communications Conference Cali, Colombia, ISBN:978-1-4673-1268-4, Mayo de 2012.
- **Jhon James Granada Torres**, Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G., "Efectos de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas de radio sobre fibra con portadoras a 60 GHz y 100 GHz", en Memorias XVI Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial, pp. 174-179, ISBN 978-958-8347-55-4, Cali, Colombia, septiembre de 2011.
- **Jhon James Granada Torres**, Jesús Álvarez G., Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G., "Análisis del desempeño de la transmisión de datos en redes ópticas pasivas de largo alcance", en Memorias del primer Congreso internacional de telecomunicaciones, ISBN 978-958-8477-27-5, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, septiembre de 2011.

### En revistas

- **Jhon James Granada Torres**, Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G., "Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas", Revista de ingeniería y desarrollo, indexada en Colciencias (categoría A2), Universidad del Norte, ISSN: 0122-3461 (impreso). ISSN: 2145-9371 (online).
- **Jhon James Granada Torres**, Jesús Álvarez G., Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G., "Análisis del desempeño de la transmisión de datos en banda base y RF sobre redes PON de largo alcance", Revista IECKNE Indexada en Publindex - Categoría B, ISSN 1692 - 1798, Vol.9 No.1, 2012.
- **Jhon James Granada Torres**, Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G. "Efectos de la dispersión cromática en sistemas de radio sobre fibra modulados en BPSK en la banda de las ondas milimétricas", (Proceso de evaluación), 2012.
- **Jhon James Granada Torres**, Margarita Varón, Neil Guerrero G., "Monitoreo de la dispersión cromática en sistemas de Radio sobre Fibra usando ajustamiento gaussiano en histogramas asíncronos", (Pendiente sometimiento a evaluación), 2012.

# Contenido

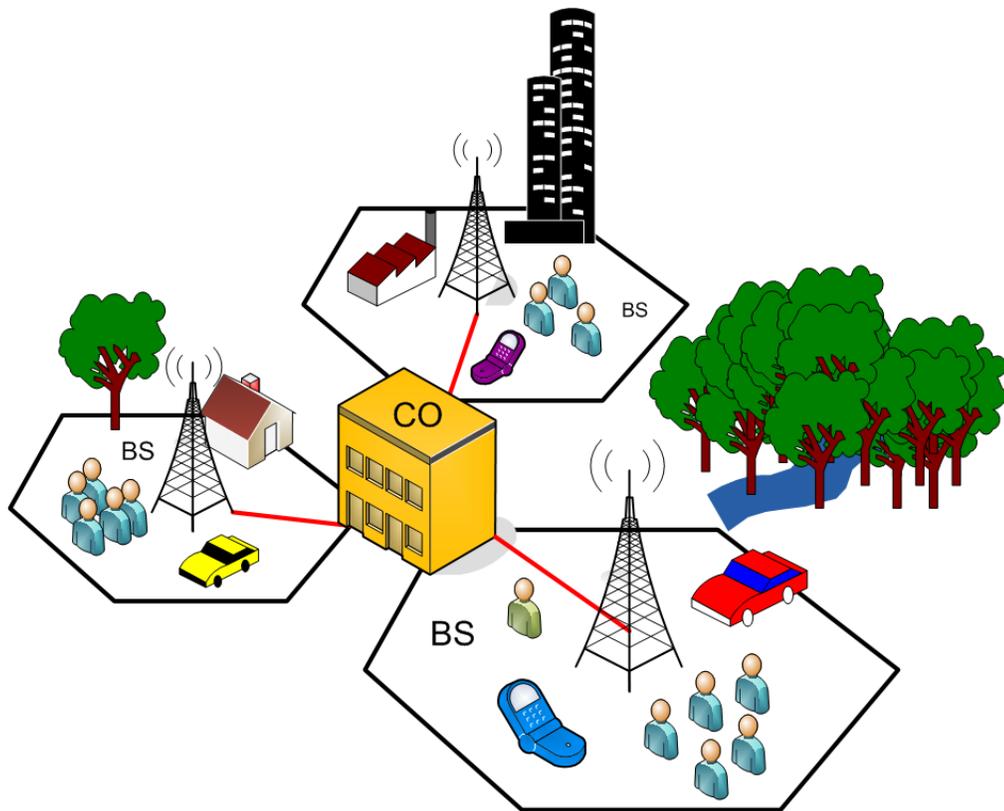
<b>Agradecimientos</b>	<b>6</b>
<b>Resumen</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Producción bibliográfica de la tesis</b>	<b>9</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Redes híbridas de nueva generación . . . . .	1
1.2. Monitoreo óptico . . . . .	3
1.3. Líneas generales de la tesis . . . . .	4
<b>2. Tecnología de Radio sobre Fibra</b>	<b>6</b>
2.1. Surgimiento de la Radio sobre Fibra . . . . .	6
2.2. Sistema de Radio sobre Fibra: Ventajas . . . . .	8
2.3. Evolución de sistemas de Radio sobre Fibra en ondas milimétricas . . . . .	9
2.4. Desarrollo de dispositivos para sistemas RoF . . . . .	10
2.5. Transmisiones logradas en RoF y pruebas experimentales recientes . . . . .	11
2.6. Modulación en sistemas RoF . . . . .	14
2.6.1. Modulación en intensidad y Detección directa . . . . .	15
2.7. Dispersión Cromática . . . . .	16
<b>3. Monitoreo del efecto de la dispersión cromática en sistemas RoF</b>	<b>20</b>
3.1. Análisis espectral óptico de tonos simples . . . . .	20
3.2. Análisis espectral de transmisión de tonos simples y modulación de amplitud en el dominio eléctrico . . . . .	25
3.3. Cálculo de la magnitud de error vectorial mediante transmisiones BPSK en RF	29
3.4. Cálculo de la tasa de error de bit . . . . .	34
3.5. Análisis de la distorsión por medio de diagramas de ojo y pulsos temporales	38
3.6. Monitoreo de la dispersión cromática usando histogramas asíncronos . . . . .	48

---

<b>4. Sistemas de Radio sobre Fibra modulados en fase óptica con detección coherente</b>	<b>57</b>
4.1. Modulación en fase óptica y detección coherente . . . . .	57
4.1.1. Modulador de fase óptica . . . . .	58
4.1.2. Receptor Coherente . . . . .	59
4.2. Análisis espectral . . . . .	61
4.3. Diagramas de constelación y curvas BER vs. SNR transmisión en PSK . . .	64
<b>5. Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>71</b>

# 1 Introducción

## 1.1. Redes híbridas de nueva generación



**Figura 1-1:** Redes de acceso heterogéneas de banda ancha de próxima generación (Radio sobre fibra)

Las redes de nueva generación se prevén como sistemas altamente heterogéneos debido a los diferentes servicios (ej. internet y comunicaciones móviles), formatos de modulación, tasas de bit y a las interfaces involucradas en la red de transporte óptico. Adicionalmente, la flexibilidad y la capacidad de actualización, junto con un control autoconfigurable en la oficina central (CO - Central office), requiere nuevas soluciones dentro del campo del manejo de las redes. La figura 1-1 muestra el escenario previsto para estas redes heterogéneas. Adicional a esto, la demanda imparable de diversos servicios que exigen un gran ancho de banda por

parte de los usuarios finales, así como la alta tasa de transmisión ha incrementado aun más los efectos de las imperfecciones de la fibra óptica sobre la señal de datos.

El principal cuello de botella en las redes de hoy en día es el segmento de la red de acceso y para encarar este problema las redes ópticas pasivas son una solución indispensable [1], este tipo de redes tienen todas las características para convertirse en la plataforma exclusiva de transporte de sistemas de comunicaciones heterogéneas, y tiene la ventaja de solo usar elementos activos en los extremos de la red lo que reduce costos en su despliegue, permitiendo el surgimiento de la tecnología de radio sobre fibra, una tecnología que permite la transmisión de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica para el aprovechamiento de las ventajas de la fibra y de las redes inalámbricas, en el capítulo II se expone el surgimiento, evolución y tendencia de esta tecnología.

Las redes de fibra óptica operan de manera estática en un rango de especificaciones o estándares bien definidos, un cambio en un sólo parámetro de la red puede afectar drásticamente la transmisión. Con el fin de mejorar el manejo y control de las redes se requiere una estimación precisa de las imperfecciones en la transmisión con el fin de planear mejores enrutamientos, lo que genera la necesidad de una red inteligente que "lea e interprete" la variación de sus parámetros para garantizar una buena calidad de servicio.

Las características más deseables de una red inteligente futura incluyen alta robustez, reconfigurabilidad, flexibilidad, y seguridad. Para permitir la robustez y la operación inteligente la red debe ser capaz de: (1) medir los efectos del canal óptico durante la transmisión, y la calidad de las señales transmitidas (2) diagnosticar de manera no supervisada sus fallas; (3) prevenir fallos y redireccionar transmisión de datos por rutas más seguras; (4) asignar eficientemente la potencia de la señal, el ancho de banda del canal, la longitud de onda, tener ecualización adaptativa, codificar los datos, determinar las trayectorias; (5) cambiar tablas de enrutamiento y redireccionar el tráfico basado en las condiciones de la capa física; y (6) detectar riesgos en la seguridad. Todas estas características deseables requieren primero la habilidad de medir los elementos de la red, definir un esquema de planeación de trayectorias y datos de manera exacta. La habilidad de medir los parámetros de la red es lo que se conoce como monitoreo. Esta medición de la calidad de los datos y del estado físico de las trayectorias de la red en tiempo real es difícil debido al gran número de imperfecciones, la variedad de los formatos de datos, la variedad en las tasas de transmisión y el continuo crecimiento y cambio de la estructura de la red [2].

## 1.2. Monitoreo óptico

El monitoreo de las imperfecciones de la fibra ha surgido como una solución prometedora para encarar los retos de la red y cumplir con los requerimientos de la calidad del servicio para satisfacer la demanda de los usuarios. Las redes transparentes requieren gestionar los fallos de la red en la propia capa física, donde las técnicas de monitorización óptica deben encargarse de supervisar la calidad de múltiples canales de alta velocidad y detectar sus posibles degradaciones.

El monitoreo del rendimiento óptico puede llevarse a cabo midiendo los cambios en los datos y determinando en tiempo real los cambios resultantes de varias imperfecciones, tales que un cambio en un efecto particular cambiará el parámetro de medida. El monitoreo debe ser continuo porque las señales alteran su trayectoria durante la conmutación y las condiciones de la transmisión sometidas a cambios frecuentes. Convencionalmente, la supervisión del rendimiento se ha hecho en el dominio eléctrico, donde la calidad de la señal puede ser evaluada a través del conteo de errores de bit o de tramas, además, se pueden emplear técnicas para monitorear cambios en la potencia de un tono de radiofrecuencia o en la distribución de potencia espectral del canal [3], o en técnicas de post-procesamiento eléctrico en el caso específico de detección coherente [4], [5], [6], [7].

El monitoreo de rendimiento óptico no solo supervisa la calidad de la señal en ambientes transparentes, sino que también da nuevas posibilidades de distinción del origen del deterioro en las señales. El alto rendimiento en las redes ópticas son susceptibles a varios efectos de degradación que pueden cambiar en el tiempo. Conocer la degradación del canal de datos sirve para diagnosticar la red, reparar el daño por medio de un ecualizador o compensador, y/o redireccionar el tráfico para evitar enlaces no óptimos. Por lo tanto, es importante monitorear los canales por muchos tipos de imperfecciones, tales como la relación señal a ruido óptica (OSNR, optical signal to noise ratio), dispersión cromática, dispersión por modo de polarización y no linealidades de la fibra, las cuales pueden variar con la temperatura, con el mantenimiento del sistema y con la reconfiguración de ruta. Las características claves del monitoreo del rendimiento óptico están en la implementación y en la habilidad para acomodarse a los diferentes formatos de modulación y de imperfecciones [8].

El parámetro clave a la hora de monitorear las prestaciones de un sistema de comunicaciones digitales es la tasa de error de bit conocida como BER por sus en inglés (bit error rate). Este parámetro fija en última instancia la calidad de la señal digital. Ahora bien, las medidas de BER requieren fotodetectar la señal en el caso de una red óptica, por lo tanto, se necesita un parámetro alternativo, que presente correlación con la tasa de error, pero que a diferencia de ésta pueda monitorearse en el dominio óptico y de una manera relativamente sencilla. Este parámetro es el ya mencionado OSNR, el cual se define como la relación entre la potencia

media de señal y de ruido para un determinado canal óptico.

En las transmisiones en banda base sobre fibra óptica, uno de los factores más influyentes en el aumento de la BER es la interferencia intersímbolo causada directamente por la dispersión cromática propia de la fibra, esta dispersión ha sido de gran estudio en los sistemas ópticos logrando compensaciones exitosas. En transmisiones de señales de radiofrecuencia se desea monitorear los efectos de la dispersión cromática. En esta tesis se hace un análisis espectral en los dominios óptico, evidenciando la no afectación de esta dispersión a los espectros de RF, por lo cual, se necesita un método de monitoreo en el dominio temporal. Luego de un análisis de las transmisiones en el tiempo de forma cualitativa en los diagramas de ojo y porcentual mediante el cálculo de la magnitud del error vectorial, se hizo notoria la generación de nuevos niveles en la señal recibida. Por tal razón, se propuso un novedoso método de monitoreo de la dispersión usando histogramas asíncronos, que a diferencia de los métodos estudiados en el estado del arte ([9], [10], [11], [12], [13]), el modelo desarrollado calcula el número de picos del histograma y realiza un ajustamiento de  $k$  distribuciones gaussianas haciendo agrupamiento (clustering) de los puntos del histograma mediante el algoritmo de máxima esperanza (EM, expectation-maximization), y con el valor de la media estadística y la cardinalidad de cada agrupamiento se plantea una estimación numérica que propone un factor de dispersión.

### 1.3. Líneas generales de la tesis

En esta tesis se realiza un estudio sobre los sistemas de comunicaciones basados en la tecnología de radio sobre fibra en diferentes configuraciones y características para evaluar la viabilidad de futuras aplicaciones en la distribución de señales de onda milimétrica en escenarios móviles y redes de acceso.

En el capítulo II se hace una descripción del estado del arte de la tecnología de radio sobre fibra, se justifica su avance tecnológico y el apunte hacia los sistemas que transmiten señales de radiofrecuencia en la banda de las ondas milimétricas y se describe su funcionamiento, además, en este capítulo se hace una descripción detallada de la dispersión cromática cromática, parámetro de estudio en la disertación.

En el capítulo III se analizan los efectos de la dispersión cromática en un sistema de Radio sobre con detección directa, analizando el espectro óptico y eléctrico, además de la obtención de las curvas BER vs. ONSR para transmisiones a 250 Mbps y 1 Gbps con longitudes de fibra de 40 y 80 km. Se estudian los efectos de la dispersión cromática en un sistema con modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) mediante el cálculo porcentual de la magnitud del error vectorial y se hace un análisis en el dominio temporal de la señal detectando distorsiones en los diagramas de ojo. Al final de esta sección se plantea un novedoso método de monitoreo de la dispersión mediante un ajustamiento gaussiano usando el

algoritmo de EM en histogramas asíncronos.

En el capítulo IV se describe un sistema de radio sobre fibra modulado en fase óptica con detección coherente con modelado matemático y simulaciones del impacto que tiene la dispersión cromática en estos sistemas, donde la información transmitida está modulada por desplazamiento de fase binaria (BPSK) y cuaternaria (QPSK) con portadoras de RF. Se muestran los espectros de la señal de radio frecuencia y las curvas de tasa de error de bit versus relación señal a ruido óptica para frecuencias de portadora de 60, 75 y 60 GHz en longitudes de fibra óptica de 40 y 80 km.

## 2 Tecnología de Radio sobre Fibra

### 2.1. Surgimiento de la Radio sobre Fibra

El desarrollo de los sistemas de comunicaciones actuales ha sido liderado por el gran incremento en la demanda de ancho de banda de los usuarios finales de los operadores de telecomunicaciones [14]. Los múltiples servicios inalámbricos que soportan las redes, exigen mayor capacidad de transmisión de datos a velocidades multi-Gbps [15]. En los últimos años se ha observado el gran avance de las aplicaciones multimedia como la televisión de alta definición (HDTV, high definition television) y video 3D, las cuales exigen un gran ancho de banda no suministrado totalmente por las actuales interfaces, para el acceso inalámbrico de estos servicios [16]. Este hecho ha estimulado el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica a altas velocidades, para la provisión de servicios con la misma capacidad de transmisión de las redes cableadas. Por esta razón, se empezó a estudiar nuevas regiones del espectro debido a que la alta demanda en la tasa de transmisión produjo una congestión en las bandas actuales: GSM, W-CDMA, Wi-MAX entre otras [17] (Ver tabla de estándares inalámbricos). Este suceso resultó en un gran interés de la comunidad científica por investigar en los temas referentes a la generación y transmisión de señales microondas y de onda milimétrica (MMW, *millimeter-wave*). Aunque los sistemas convencionales de redes WLAN (IEEE802.11a, b y g) ofrecen teóricamente tasas de transmisión de 54 Mbps, las alternativas más modernas como "ultrawideband" (UWB) [18] y sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) son capaz de extender la velocidad de transmisión inalámbrica a varios cientos de Mbps, teniendo como objetivo alcanzar hasta 1 Gbps en un futuro cercano [19]. Sin embargo esta velocidad no es suficiente para transmitir señales de televisión HDTV en vivo dado que solo un "stream" de HDTV (1080i) sin comprimir requiere una tasa de transmisión de alrededor de 1,5 Gbps [19].

La transmisión en el rango de las MMW ( $30GHz - 300GHz$ ) es una solución para proveer mayor ancho de banda, no obstante, surgen limitantes en su implementación, tales como los altos costos, la alta atenuación del medio inalámbrico, además de dificultades en el diseño de instrumentación especial para este rango de frecuencias. Con respecto a la alta atenuación del medio, una de las soluciones más prometedoras consiste en transmitir las señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica, que además posee grandes ventajas con relación al cobre, como su mayor capacidad de transmisión, inmunidad a las interferencias electromagnéticas y pérdidas en la propagación las cuales son inferiores a los 0,5 dB/km. Con el fin de tomar ventaja de

esta circunstancia se han desarrollado plataformas de comunicaciones heterogéneas/híbridas conocidas como radio sobre fibra (RoF, Radio over Fiber), donde se aprovecha la flexibilidad de las redes inalámbricas y el gran ancho de banda de la fibra.

**Tabla 2-1:** Estándares inalámbricos

Estándares Inalámbricos	Vel. de transmisión	Frecuencia (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 tecnología de la fibra hasta la casa (FTTH, Fiber to the home) fue propuesta como la solución más prometedora para proveer de gran ancho de banda a las redes de acceso. FTTH se ha implementado en redes ópticas pasivas (PON, Passive Optical Network) en una arquitectura punto-multipunto, desde una oficina central (CO, Central Office) hasta los usuarios finales [23], [20]. Las redes PON permiten ofrecer servicios de banda ancha a usuarios localizados a distancias de hasta 20 km de la CO [20], con estándares como el ITU-T G.984, conocido como GPON (Gigabit capable PON) con velocidades de transmisión ascendente (upstream) de hasta 1,25 Gbps y descendente (downstream) de hasta 2.5 Gbps.

## 2.2. Sistema de Radio sobre Fibra: Ventajas

En un sistema RoF basado en PON, se transmiten señales de radio a través de la fibra óptica directamente hasta la estación base (BS, base station). Cuando existen varias estaciones base, un dispositivo pasivo conocido como divisor (splitter) [21], divide la señal a las BS como se observa en la figura 2-1.

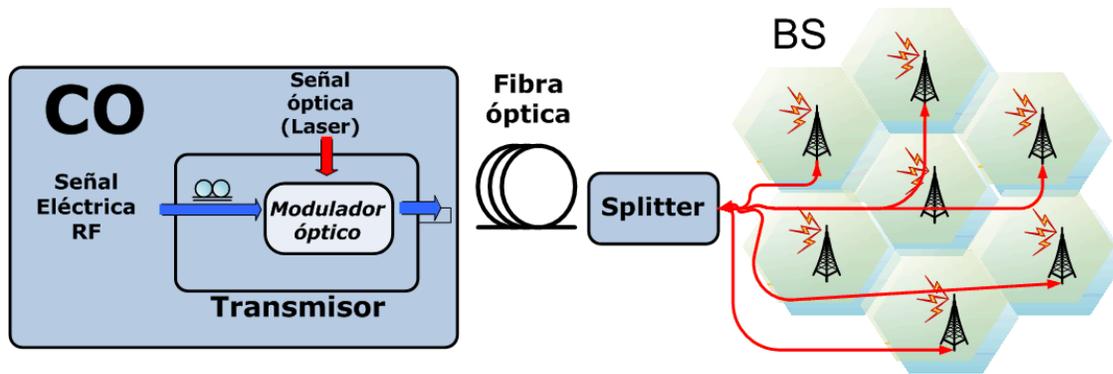


Figura 2-1: Sistema de Radio sobre Fibra

La ventaja principal de RoF es la habilidad de concentrar la instrumentación costosa en la CO, el resto de dispositivos y equipos que son más simples y de bajo consumo de potencia son instalados en los lugares de acceso generalmente a distancias largas desde la CO. Una de las ventajas más significativas es la flexibilidad de la red y la potencialidad en la distribución y re-uso de las señales entre los usuarios [22]. Cuando la señal RF está en el rango de las ondas milimétricas (30 GHz a 300 GHz), la fibra proporciona un ancho de banda de varios GHz [1], pero se requieren de células pequeñas debido a la corta distancia de propagación [22]. Las estaciones base solo son utilizadas para realizar la conversión opto-eléctrica, por lo que su configuración es simple e independiente del protocolo y del formato de modulación [23], ya que se evita la generación de una portadora de radio de alta frecuencia en las BS, debido a que esta genera en la CO. De esta manera, los enlaces de radio de onda milimétrica están siendo considerados para el diseño de sistemas micro ó pico celulares de banda ancha, redes de acceso y redes inalámbricas internas. La convergencia de las comunicaciones inalámbricas y los sistemas de fibra óptica se han convertido en una técnica prometedora para proveer servicios de acceso inalámbrico de banda ancha, en un rango de aplicaciones que incluyen soluciones en redes de acceso, y la extensión de la cobertura y de la capacidad en las redes de radio.

Las redes de acceso de próxima generación progresan hacia la convergencia de servicios cableados e inalámbricos, con el objetivo de ofrecer eficientemente servicios de gran ancho de banda a bajo costo. Los sistemas RoF lideran el progreso de las redes de acceso mediante los avances significativos en aspectos como: el incremento en la capacidad de transmisión y

el ancho de banda, así como la disminución de los costos de las redes fijas y móviles [24]. En esta red de configuración híbrida, hay un punto clave en el éxito de su operación que consiste en la generación y la transmisión de señales a alta velocidad en modo cableado o inalámbrico de manera simple y confiable.

### **2.3. Evolución de sistemas de Radio sobre Fibra en ondas milimétricas**

Hace casi dos décadas, se empezaron a estudiar los sistemas de RoF con MMW, pero estos no modulaban la señal de MMW dentro de la portadora óptica en la fibra, por lo que se necesitaba una estación base (BS, Base Station) compleja para la conversión [26]. El uso de señales de radio sobre fibra en sistemas de antenas distribuida (F - DAS) desplaza el procesamiento electrónico de la antena a un punto central (CO) [25], abriendo nuevas oportunidades en la creación de redes híbridas, las cuales aún no han sido plenamente explotadas. Cambiar la ubicación de los equipos significa que la capacidad ahora se puede reasignar a cualquier punto de la red, en lugar de ser fijada por el equipo que se instala en una BS particular.

Otro de los grandes retos que se tienen en el área de la RoF, es poder tener unidades de antenas remotas (RAU, remote antenna units) que puedan cubrir múltiples bandas facilitando su distribución. En este escenario se podrían implementar esquemas de asignación dinámica de ancho de banda, con el fin de proporcionar eficientemente el ancho de banda a los usuarios finales, los cuales cambian dinámicamente su demanda de acuerdo a los servicios requeridos en diferentes instantes y lugares. De esta manera, este tipo de redes ofrece una ventaja adicional basada en la posibilidad de cambio de capacidad asignada, la cual puede variar en la red de acuerdo a las densidades de tráfico y las demandas de los usuarios [27].

El enorme ancho de banda ofrecido por la fibra tienen otros beneficios aparte de la alta capacidad para transmitir señales microondas. El gran ancho de banda óptico permite el procesamiento de señales a alta velocidad que podría ser más difícil de hacer en sistemas electrónicos, por ejemplo el filtrado de señales de MMW se puede lograr convirtiendo la señal eléctrica a óptica y realizar el filtrado usando componente ópticos basados en redes de Bragg en fibra óptica (FBG, Fiber Bragg Grating) o el interferómetro Mach Zender (MZI, Mach Zender Interferometer). No obstante, el gran problema al transmitir señales de MMW sobre fibra óptica es la degradación de la señal debido a la dispersiones de la fibra.

Los sistemas inalámbricos de MMW con canales de ancho de banda por encima de los 10 GHz podrían fácilmente proveer capacidades multi-Gbps, incluso con formatos de modulación

simples como ASK o QPSK. Estos sistemas son sugeridos como una posible alternativa no solo para el acceso óptico sino también para futuras redes de retorno (backhauling) móviles, evitando el cuello de botella que presentarían las futuras redes LTE (Long term evolution) que llegarían a velocidades de 1 Gbps [28]. La banda ubicada en el rango de los 75 GHz y 110 GHz denominada banda W, es de interés particular, debido a que presenta una ventana de transmisión más amplia con pérdidas mínimas de propagación y estaría más adecuada para aplicaciones multi-Gbps en exteriores en un futuro cercano [29]. Se espera la introducción del estándar Ethernet inalámbrico de 10 Gbps, que soporte la convergencia de sistemas cableados e inalámbricos en el acceso y así permita garantizar una adecuada función de "backhauling" en una red de telefonía móvil en un futuro próximo [19].

Los principales retos de los sistemas fotónicos basados en MMW son: mejorar el desempeño de los dispositivos que los integran, adaptar estos sistemas a la región espectral de operación, aumentar la eficiencia de conversión de los dispositivos opto-electrónicos e incrementar su rango dinámico, compensar las dispersiones de la fibra, y a su vez, reducir los costos de estos avances tecnológicos [30], [31]. Se espera que la tecnología RoF pueda proveer una arquitectura que soporte múltiples servicios y estándares de radio, que sea flexible, y confiable con BS cada vez más simplificadas.

## 2.4. Desarrollo de dispositivos para sistemas RoF

Los elementos fundamentales en un sistema RoF son dispositivos que permiten la modulación de las señales, o el control, o la detección a frecuencias muy altas. Desde la invención del primer semiconductor laser, se ha progresado en el diseño de láseres que admiten modulaciones directas con anchos de banda microondas e inclusive en el rango MMW. Actualmente, en varias aplicaciones de sistemas RoF se utilizan láseres de diodo con realimentación distribuida (DFB, Distributed Feedback Laser), debido a su ancho de línea estrecho, su bajo ruido y alta linealidad. Investigadores de la Universidad de California demostraron una frecuencia de resonancia de 72 GHz en un láser DFB [32], y a 50 GHz para un láser de cavidad vertical llamado VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) [33]. El uso de los láseres VCSEL, para modulación directa en sistemas RoF, se ha incrementado debido a factores como su bajo costo y a su capacidad de transmitir a velocidades multi-Gbps en enlaces de fibras multimodo, en la primera ventana a 850 nm y la segunda ventana de transmisión a 1300 nm [34].

Para sistemas con modulación externa, se han alcanzado transmisiones a 14 Gbps con portadora de 60 GHz usando el MZM para rango corto [35] y con modulaciones en amplitud (m-ASK, amplitude shift keying) y en desplazamiento de fase binaria (BPSK, Binary phase shift keying) usando una configuración en cascada como se plantea en [36], con señales MMW de hasta 40 GHz, teniendo como limitaciones las no linealidades del MZM [37].

En [38] demuestran experimentalmente un "transceiver" fotónico, basado en modulación de fase de una fuente óptica de gran ancho espectral para el transporte de señales RoF sobre 20 km de SMF. En [39] proponen y demuestran un esquema de un convertidor óptico, para la conversión de datos de 1 Gbps en banda base (BB, baseband) a MMW de 40 GHz. Este desarrollo muestra el cumplimiento de uno de los retos para sistemas RoF, pues estos convertidores poseen un tamaño compacto, son de bajo costo, lo que lo hace ideal para aplicaciones altamente integradas.

Para sistemas de corto alcance se reporta en [40] la creación de un transmisor RoF sin amplificación RF, con el que se demostró una transmisión a 12,5 Gbps sobre distancias inalámbricas de hasta 3,1 m con una sensibilidad en el receptor de aproximadamente -45,4 dBm. Para enlaces de acceso de rango medio, se usó un amplificador eléctrico en el transmisor RoF, para este caso, en una transmisión a 7,5 Gbps se demostró en exteriores con línea de vista, una distancia máxima alcanzada de 36 m.

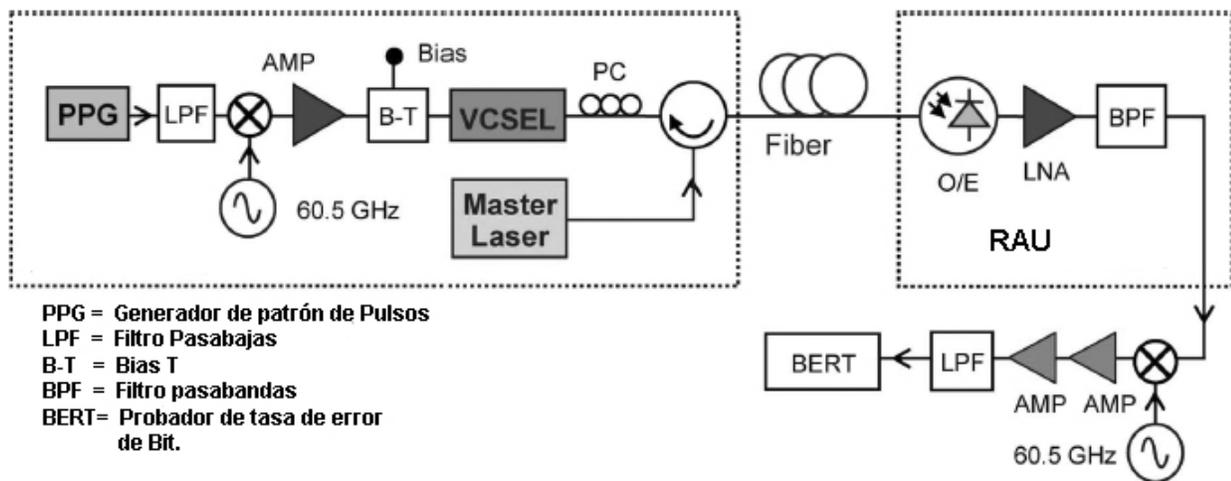
Tradicionalmente, los dispositivos electrónicos de MMW se fabrican con tres y hasta cinco componentes, entre los que se destacan el GaAs e InP [26], sin embargo estas tecnologías son muy costosas y menos disponibles que la conocida CMOS [41]. Con esta tecnología se creó un amplificador de bajo ruido que opera en la banda de los 60 GHz [42]. En [26] muestran una comparación del rendimiento de los amplificadores de bajo ruido CMOS, donde el rango de ganancia está entre los 15 y los 22.4 dB y del ruido entre los 4,4 y 6,1 dB.

## 2.5. Transmisiones logradas en RoF y pruebas experimentales recientes

En la banda W [43], donde se prevén la redes de próxima generación, son relevantes las dispersiones de la fibra, por lo tanto, métodos como la multiplexación de subportadoras (SCM, subcarrier multiplexing) ya presenta inconvenientes en esta banda de transmisión. En [23] nombran algunos métodos utilizados para la generación de señales de MMW para enlaces de subida y de bajada sin que la señal sufra un desvanecimiento considerable, además proponen un sistema de acceso RoF a 60 GHz que alcanza una transmisión de 1 Gbps por medio de una técnica heterodina en el dominio óptico. Para sistemas con frecuencias más bajas se ha podido compensar los efectos de la dispersión cromática. Por ejemplo, en [44] se expone una red WiMax que alcanza distancias hasta de 410 km en fibras monomodo gracias a la unión de fibras compensadoras de dispersión elaboradas a partir de FBGs.

En frecuencias WiMax de 3,5 GHz, solo alcanzaban distancias de 180 km. En [45] exponen un sistema WiMax similar pero que usa OFDM que logra distancias de 792 km a 120 Mbps.

Con otros sistemas que OFDM, se han logrado transmisiones a 16 Gbps sobre 20 km de fibra y 6 m de distancia inalámbrica usando portadora de 24 GHz [46]. La distancia de transmisión a frecuencias de MMW se ve muy limitada por el desvanecimiento de la potencia derivado de la atenuación propia de la fibra y la dispersión cromática del enlace [47]. En [27] estudian el impacto de la dispersión cromática para el transporte de señales RF a 64 GHz y velocidades de 2,5 Gbps, en el cual exponen las limitaciones en las distancias de transmisión para modulación de portadora suprimida (OCS - optical carrier suppression) y de banda lateral única con portadora (OSSB+C - Optical single sideband with carrier). Este trabajo reporta experimentos donde se alcanzan distancias de 34 km y 95 km respectivamente sin degradación de la señal por la dispersión cromática. Resultados experimentales en [48], muestran que un sistema RoF a 60 GHz que usa un láser VCSEL de tolerancia a la dispersión cromática (Véase la figura 2-2), debido a la inherente modulación de banda lateral única (BLU) producida por la inyección de bloqueo del láser con formatos de modulación QPSK y ASK. A diferencia de la modulación estándar, la BLU elimina la banda que transmite la portadora y la banda redundante que contiene la información, optimizando la modulación gracias a que evita el gasto innecesario de energía, permitiendo el alcance de distancias de transmisión de 20 km a 2 Gbps. En este caso, la dispersión de la fibra y la distorsión inducida por el modulador óptico deben ser tenidas en cuenta para los diseños de este tipo de redes.

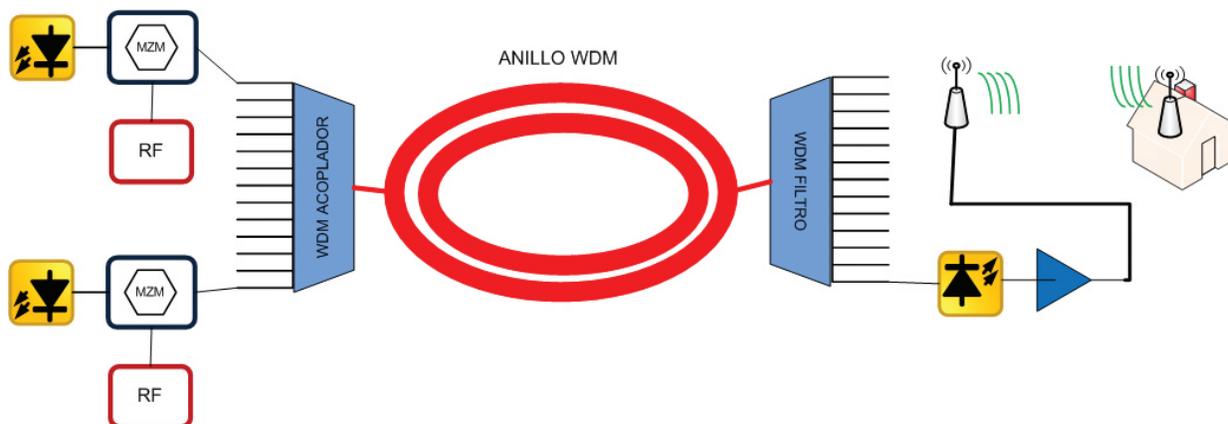


**Figura 2-2:** Sistema RoF experimental, con modulación directa del VCSEL a multi-Gbps a 60 GHz [30]

En [43] construyen un sistema RoF que usa una portadora de MMW de doble banda lateral con portadora única (DSB-SC, double side band - suppressed carrier) con modulación de amplitud (OOK, on-off keying) para transmisiones internas, alcanzando un BER de  $10^{-9}$  a 3,1 m. En [14] analizan el rendimiento de una transmisión en la banda de los 60 GHz a 4 Gbps y muestra que es posible compensar los efectos de la dispersión cromática de la fibra

en estos sistemas usando un método sencillo de ecualización como el de pre-alimentación (feed-forward), además demuestran el uso de un sistema RoF para generar señales a 60 GHz moduladas en QPSK a 7 Gbps.

Un algoritmo implementado recientemente en los receptores basados en DSP es el de 'k-means' el cual es un método novedoso descrito en [49]. El algoritmo de 'k-means' es menos complejo que algoritmos como el de Viterbi que requiere mayor información estadística. 'k-mean' permite la recuperación de la portadora en cualquier formato de modulación, además estima el desplazamiento de fase del sistema,. Este algoritmo ofrece ventajas adicionales con respecto a la adición de módulos digitales en paralelo sin requerimiento de más potencia, lo que permite potencializar las funciones realizadas. En [50] registran una transmisión experimental a 40 GHz y 4 Gbps para enlaces RoF PM con detección coherente basado en DSP, y en [51] reportan una transmisión a 12.5 Gbps para un sistema de tres canales multiplexados por división de longitud de onda (WDM, wavelength division multiplexing) en un enlace RoF codetección coherente, para una frecuencia de portadora de 6 GHz logrando una distancia de 78.8 km. La modulación de múltiples subportadoras (MSM, multiple subcarrier modulation) es una técnica de modulación también usada en sistemas RoF, que permite flexibilidad, multiplexación por división de frecuencia asíncrona acoplada con transmisión multicanal en el caso de redes WLAN, mientras se mantiene la simplicidad de la detección directa. . Los sistemas MSM IM/DD son atractivos, ya que el uso de varias subportadoras de banda angosta promete minimizar la ISI sobre canales multitrayecto, aunque tienen como principal inconveniente, la pobre eficiencia en su potencia óptica promedio. Esta técnica se ha implementado para transmisiones a 100 Mbps [52].



**Figura 2-3:** Sistema RoF con transporte óptico WDM

En [15] presentan un sistema RoF 'full-duplex' operando en la banda de los 60 GHz, que usa detección directa para aplicaciones de redes gigabit Ethernet, mientras que en [53], plantean

un sistema también "full-duplex" de buen desempeño hasta los 25 km de fibra óptica, cuyo enlace ascendente lo modula PSK a 100 Mbps y el enlace descendente lo modula en 16-QAM en la banda de los 6 GHz. La WDM incrementa la capacidad del sistema mediante la inserción simultánea de varias señales de diferente longitud de onda por la fibra [60]. Este sistema se muestra en la figura **2-3**. Dicho esquema de transmisión mejora la flexibilidad de la red pero está limitado por las no linealidades de la fibra cuando se eleva la potencia de la luz o se insertan muchos canales sobre la fibra, además del efecto de supresión de portadora y las no linealidades de los amplificadores ópticos [34].

Las redes de nueva generación (NGN, Next Generation Network) permitirán la convergencia y la transmisión simultánea de servicios con diferentes formatos en una misma plataforma [54], [55]. La tecnología de Radio sobre Fibra se adapta a la tendencia en las redes. Por ejemplo, en la referencia [47], proponen un esquema de RoF de buen desempeño hasta los 50 km a 20 GHz, para la transmisión de señales RF moduladas en PSK y señales en BB simultáneamente, con tasas de transmisión de 622 Mbps y 2,5 Gbps respectivamente. La configuración mostrada simplifica las BS y reduce los costos del sistema. En [56] demuestran la transmisión simultánea de señales WiMax (2,5 GHz) y GSM (1,95 GHz) en un formato RF digitalizado sobre 20 km a 48 Mbps y 270 Kbps respectivamente. Se han hecho varias investigaciones prácticas y teóricas de transmisión simultáneas de señales BB multigigabit y señales RF desde hace más de 10 años, donde han usado el modulador EAM para la conversión electro-óptica en la banda de 60GHz [57]. En [57] muestran la primera investigación de una transmisión simultánea RoF y BB con un modulador EAM que alcanza una tasa de error de bit (BER, Bit error rate) menor a  $10e - 9$ . Para las señales en BB se transmitió a 9.95328 Gbps y a 155.52 Mbps en DPSK. En otro experimento lograron un BER de  $10e - 9$  utilizando una nueva arquitectura para RoF por medio de WDM [58] para una señal en BB de 1.25 Gbps en una transmisión de 23 km, en este caso, se generó una señal de MMW de 63 Ghz usando el efecto de una portadora óptica suprimida y también enrutamiento de banda lateral, dicho autor expresa que puede ser un buen modelo de WDM-RoF para transmisión simultánea de señales alámbricas e inalámbricas en un futuro cercano. En sistemas de detección heterodina se han hecho experimentos con señales PSK de 2.5 Gbps y señales inalámbricas ASK ambas a 15 GHz [59], donde concluyen que se pueden realizar transmisiones usando polarizaciones inalámbricas diversas, asimismo simplificar ampliamente la estructura de la BS.

## 2.6. Modulación en sistemas RoF

La modulación en los sistemas RoF se genera a partir de una modulación eléctrica y una óptica. La señal eléctrica generada debe tener las especificaciones requeridas por las aplicaciones inalámbricas como GSM, UMTS, WLAN, WiMAX, entre otras (Véase la tabla **2-1**).

El proceso de superponer información en una señal luminosa se conoce como modulación

óptica, la cual se requiere para la transmisión de información a través de fibra óptica. Este proceso puede aplicarse directamente sobre la fuente óptica usando la técnica de Modulación Directa o por medio de la Modulación Externa que es de manera indirecta. (6)

Por otro lado, para transmitir información a través de un sistema por fibra óptica es necesario modular una propiedad de la portadora óptica con la señal de información. Esta propiedad puede ser: (7) la intensidad, la fase, la frecuencia.

### 2.6.1. Modulación en intensidad y Detección directa

En esta arquitectura de RoF, la portadora óptica es modulada por una señal de radio con una portadora de RF y transmitida por un enlace de fibra óptica entre la CO y un conjunto de BS. El proceso de conversión eléctrico-óptica se hace por medio de la modulación del láser, la señal eléctrica permite que el láser module su intensidad óptica de forma "On-Off", y comúnmente se usa un fotodetector en el receptor, donde la señal es convertida del dominio óptico al dominio eléctrico antes de ser amplificada y radiada por una antena. Estos sistemas se conocen como IM/DD (Modulación de intensidad/ Detección directa). Los sistemas IM/DD son los más simples y los más implementados, pero para frecuencias mayores a los 10 GHz, modular el láser directamente trae problemas debido a que el ancho de banda de este dispositivo es limitado. Este tipo de modulación genera un efecto llamado chirp, que es una fluctuación de las componentes espectrales y/o la amplitud de la potencia a la salida del dispositivo, generando la necesidad de una modulación con un dispositivo independiente al laser para altas frecuencias [61]. Por tal razón, para frecuencias mayores a los 10 GHz los sistemas IM/DD usan modulación externa [62].

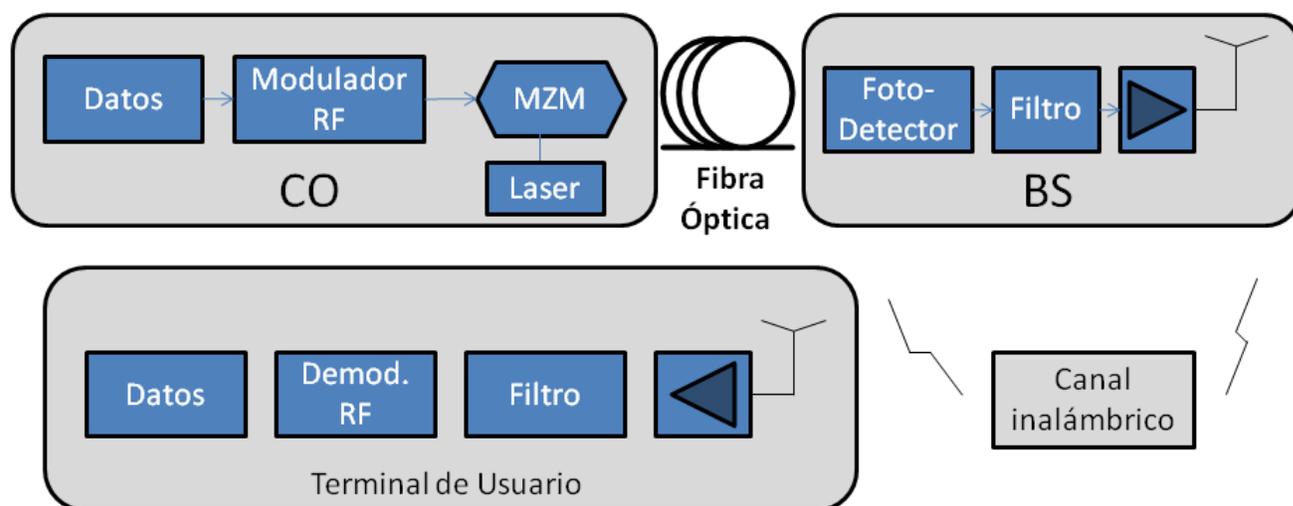


Figura 2-4: Arquitectura de la Radio sobre Fibra

La modulación externa soluciona los problemas generados con la modulación directa del laser. En este tipo de modulación son ampliamente usados el modulador Mach Zender (MZM) y el modulador de electro-absorción (EAM), este tipo de modulación consiste en transmitir la luz por una guía de onda que al inducirle un campo eléctrico esta guía permite variaciones en sus índices de refracción y altera la fase de la onda óptica [61]. Este efecto permite modular la intensidad de la luz, la cual es determinada por la señal RF que ingresa al modulador. La señal óptica luego de viajar a través de la fibra, es convertida del dominio óptico al dominio eléctrico a través de un fotorreceptores antes de ser amplificada y radiada por una antena hacia el terminal del usuario donde se demodula y se obtiene la información enviada (Ver Figura 2-4).

## 2.7. Dispersión Cromática

La fibra óptica presenta cierto tipo de defectos que afectan la información transmitida, en mayor o menor medida según el tipo de fibra utilizada, la distancia de transmisión, los formatos de modulación, las técnicas de detección entre otros. Una de las imperfecciones más influyentes en la degradación de la señal ha sido la dispersión cromática (CD, Chromatic dispersion), por lo cual ha sido ampliamente estudiada en los sistemas de banda ancha (del orden de los Gbit/s) de transmisión óptica conocidos como de banda-base, la CD no se consideraba hasta el momento como un factor de degradación relevante en sistemas de RoF debido a las relativamente bajas tasas de transmisión (del orden de los Mbit/s [27]). Sin embargo, Los sistemas de RoF de próxima generación se prevén como sistemas de alta capacidad de transmisión (tasas de transmisión del orden de los Gigabits/s) a altas frecuencias de portadora y distancias del orden de los 100 km (los sistemas de RoF investigados hasta el momento consideran distancias de transmisión de 40 km) y la idea de la tesis es evaluar los efectos de la CD en estos nuevos escenarios.

La CD es un efecto lineal inherente a la fibra, que resulta de las diferencias en el tiempo de propagación de los diferentes componentes espectrales de la señal transmitida. Estas pueden ser causadas por las propiedades dispersivas del material de la fibra (Dispersión material), o por los efectos de guía de la estructura de la fibra (Dispersión de guía de onda). La dispersión del material es originada por la dependencia del índice de refracción del núcleo con la longitud de onda óptica. La contribución de la dispersión de guía de onda depende de los parámetros de la fibra óptica, como el radio del núcleo y el índice de grupo del revestimiento del material [63], esta dispersión se origina porque la distribución de la luz entre el núcleo y el revestimiento cambia con la longitud de onda provocando un cambio en la velocidad promedio de la luz en la fibra [64]. En ausencia de no linealidades, el efecto de la CD sobre la envolvente de un pulso se puede representar mediante la siguiente función de transferencia [65]:

$$G(z, \omega) = \exp\left(-j\frac{D\lambda^2 z}{4\pi c}\omega^2\right) \quad (2-1)$$

Donde  $D$  es el coeficiente de dispersión de la fibra,  $z$  es la distancia de propagación,  $c$  es la velocidad de la luz y es la longitud de onda, y  $\omega$  es la frecuencia angular. La respuesta al impulso en el dominio del tiempo de la ecuación 2-1 está dada por:

$$g(z, t) = \sqrt{\frac{c}{jD\lambda^2 z}} \exp\left(j\frac{\pi c}{D\lambda^2 z}t^2\right) \quad (2-2)$$

Debido a la dependencia del índice de refracción del material de la fibra, con las longitudes de onda de la fuente de luz que conlleva la información, las longitudes de onda viajan a velocidades diferentes en la fibra, observándose un ensanchamiento temporal del pulso en los receptores generando una interferencia intersímbolo (ISI, intersymbol interference), siendo este fenómeno uno de los factores principales en el aumento de la tasa de error de bit (BER, Bit error rate). La CD en transmisiones de RoF con portadoras de ondas milimétricas varía su comportamiento y las ecuaciones 2-1 y 2-2 se deben modelar de otra manera. Cuando la señal a la salida del modulador entra a la fibra óptica, la fibra se puede ver como un filtro pasabanda y el canal de CD se modela de la siguiente manera [66]:

$$H(f) = e^{-j\pi D\frac{\lambda^2}{c}zf^2} \quad (2-3)$$

Teniendo una señal portadora de comportamiento senoidal:

$$C_{in}(t) = \sin(2\pi f_c t) \quad (2-4)$$

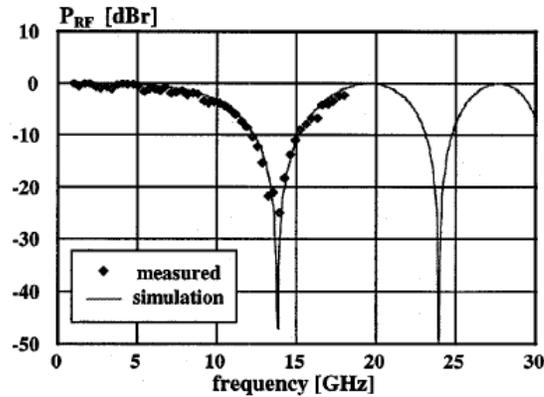
Donde  $f_c$  es la portadora óptica de onda milimétrica. A la salida del modulador de intensidad la ecuación 2-4 se vuelve de la siguiente manera:

$$E_{in}(t) = \sqrt{1 + \sin(2\pi f_c t)} e^{j2\pi\frac{ct}{\lambda}} \quad (2-5)$$

Por lo tanto, a la entrada del receptor, la señal que llega es:

$$E_{outdisp}(f) = E_{in}(f)H(f) \quad (2-6)$$

Donde  $E_{in}(f)$  es la transformada de Fourier de  $E_{in}(t)$ . En las ecuaciones 5 y 6 se puede observar el comportamiento cíclico que tendrá la señal, dependiendo de ciertos valores en los

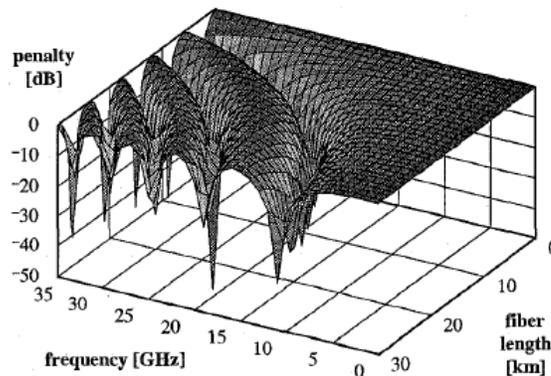


**Figura 2-5:** Potencia RF vs. Frecuencia de portadora,  $D = 17$  ps/nm.km  $\lambda = 1550$  nm,  $z = 19.2$  km

cuales aumentará o disminuirá el efecto de la CD en la señal transmitida.

La CD también genera una pérdida de potencia en la señal de RF. En la figura 2-5 se muestra la variación de la potencia de la señal en comparación con la frecuencia de la portadora, notando una variación no lineal, para un caso particular de un estudio hecho en [67].

En la figura 2-6 se expone una gráfica tridimensional para observar el comportamiento de la CD también con respecto a la distancia de transmisión, teniendo como valores límites superiores  $30GHz$  para la frecuencia de la portadora y de 30 km para la distancia de la fibra. Por esta razón es que las pérdidas en potencia no son logarítmicas según aumenta la distancia o la frecuencia de la portadora.



**Figura 2-6:** Limitaciones en potencia debido a la CD

Para este proyecto se adoptó el modelo propuesto por VPI (Virtual photonics instruments), el cual es un software desarrollado por una empresa de fotónica que está a la vanguardia de la tecnología y actualiza sus componentes según el estado del arte, permitiendo acelerar el

---

diseño de nuevos sistemas ópticos, mejorando la tecnología de las redes existentes [68].

# 3 Monitoreo del efecto de la dispersión cromática en sistemas RoF

## 3.1. Análisis espectral óptico de tonos simples

Se simuló el sistema RoF de la figura 3-1 en VPI para transmisión de tonos simples con frecuencias portadoras de 60, 75 y 100 GHz, en la ventana de los 1550 nm a distancia de 40 y 80 km sobre fibra óptica monomodo estandar con factor de dispersión de 16 ps/nm.km y atenuación de 0.2 dB/km. Se obtienen los espectros ópticos para un canal con CD y sin CD, y en algunos casos se usa fibra óptica sin atenuación para observar diferentes comportamientos, además también se realizan pruebas adicionando al sistema un filtro óptico que permite reducir las componentes espectrales de la señal.

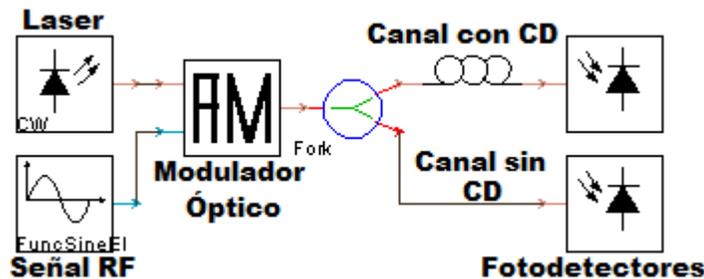
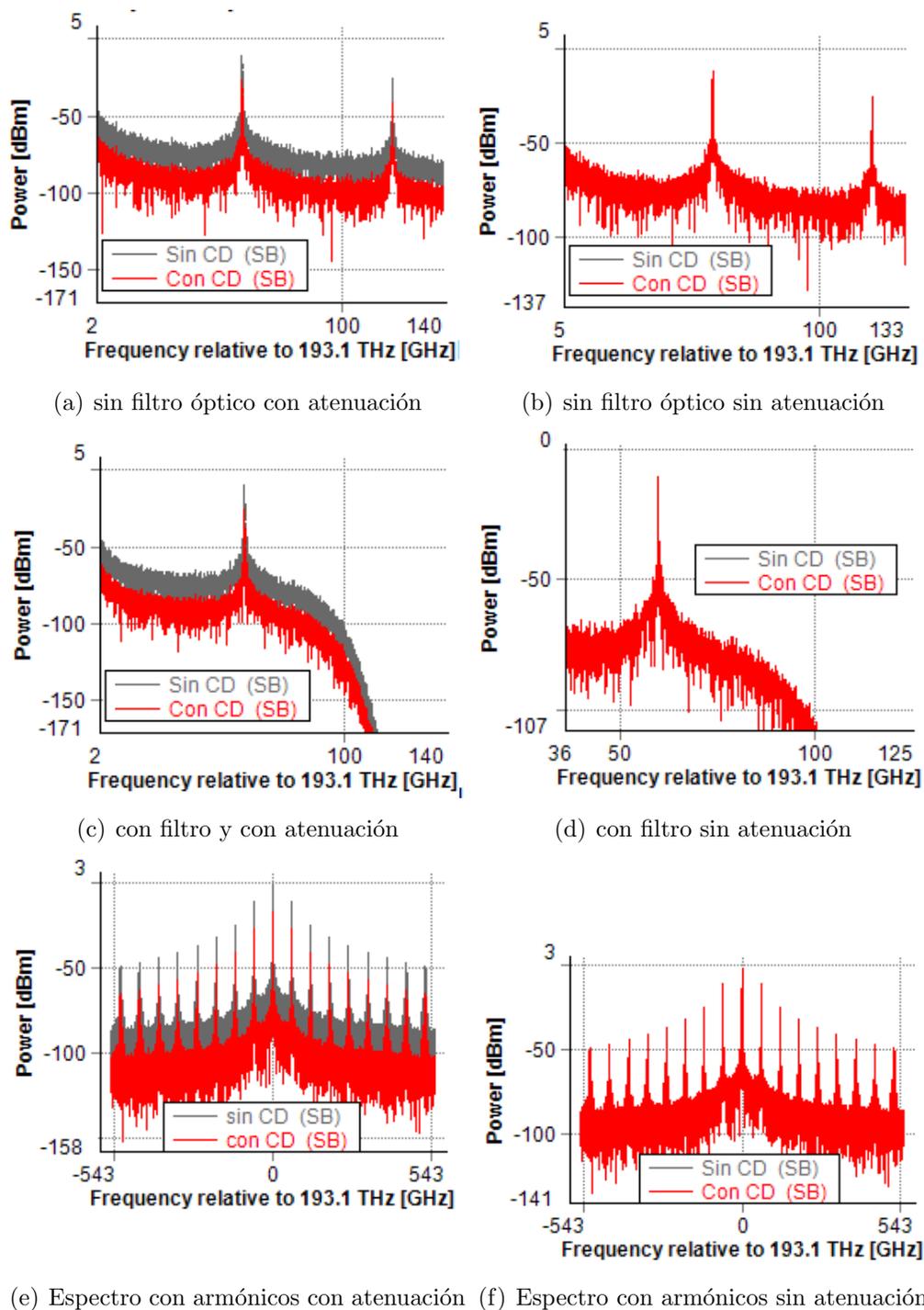


Figura 3-1: Sistema de transmisión IM/DD de tonos simples

En la figura 3-2 se muestran los espectros ópticos de una transmisión RF a 60 GHz en una fibra óptica de 80 km de longitud, en esta se puede ver como los espectros con CD y sin CD son iguales cuando se transmite por una fibra sin atenuación, además se obtuvieron 2 espectros en una transmisión que contenía un filtro óptico justo después del modulador óptico, y muestra el mismo comportamiento del espectro sólo que sin los armónicos.

Los espectros ópticos presentan armónicos naturales de la señal dado el proceso matemático de la transformada de Fourier que realiza el software. Por ejemplo a 60 GHz en las figuras 3-2e y 3-2f se muestran armónicos a 0 GHz, 60 GHz, 120 GHz, 180 GHz etc, con sus respectivos valores negativos. Estos armónicos no son generados por la CD, sino que es la

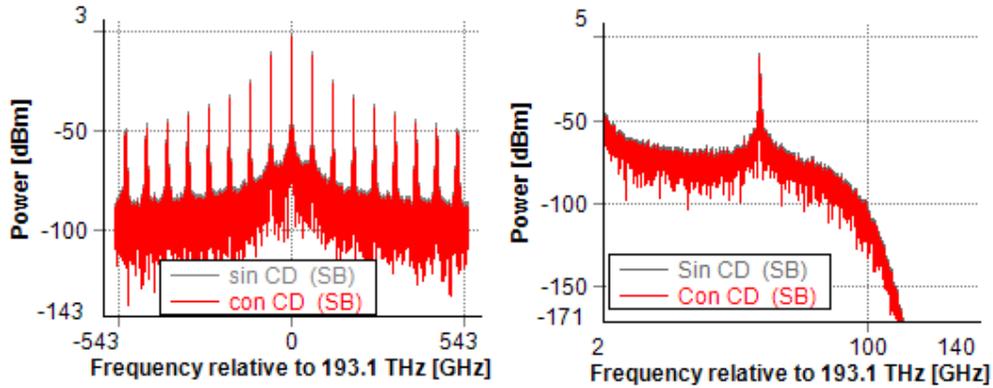
representación en el dominio de la frecuencia del tono simple transmitido.



**Figura 3-2:** Espectros ópticos tonos simples a 60 GHz en 80 km

En la figura 3-3 se muestran 2 espectros de una transmisión a 60 GHz en 10 km de fibra, y

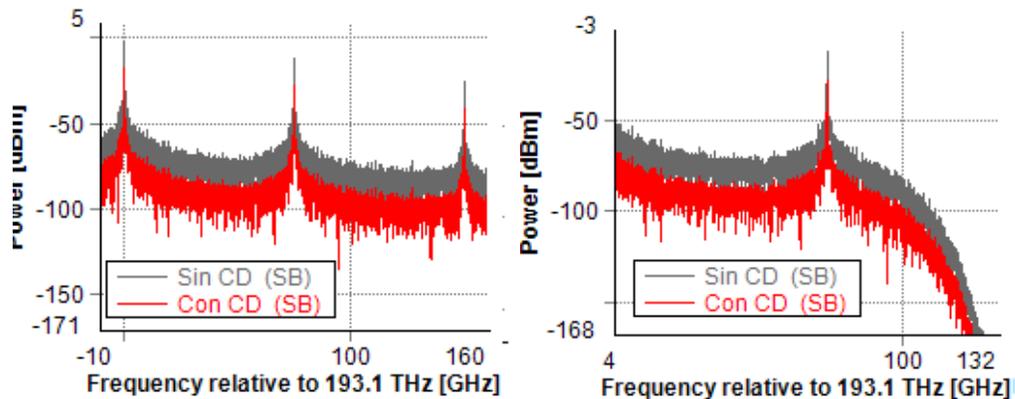
los espectros se comportan de igual manera que para 80 km, excepto que la atenuación de la fibra es menor en este último caso.



(a) sin filtro óptico y con atenuación

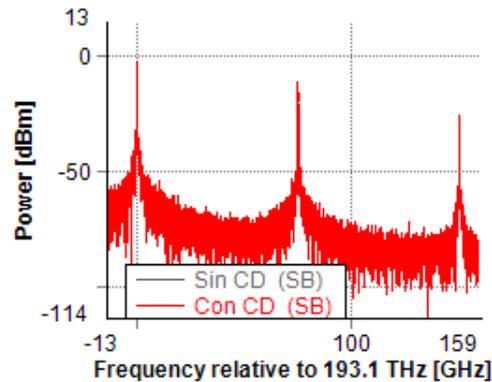
(b) con filtro óptico con atenuación

**Figura 3-3:** Espectros ópticos tonos simples a 60 GHz en 10 km



(a) sin filtro óptico y con atenuación

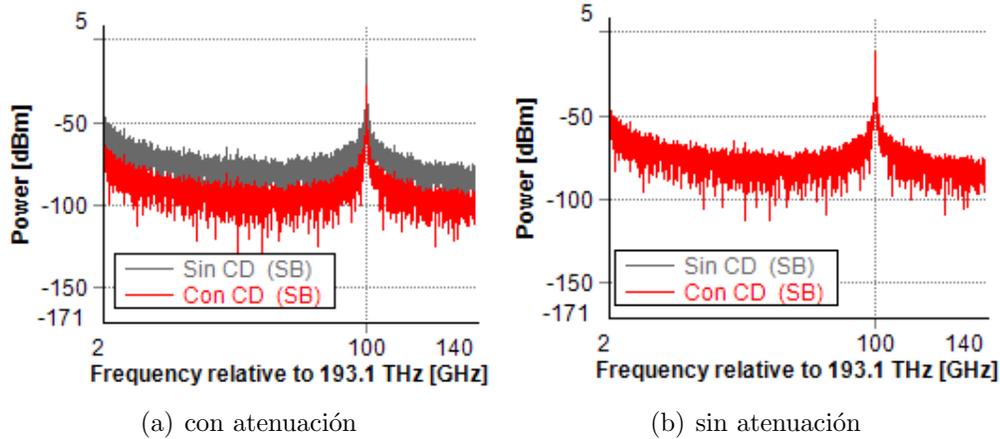
(b) con filtro óptico con atenuación



(c) con filtro óptico y sin atenuación

**Figura 3-4:** Espectros ópticos tonos simples a 75 GHz en 80 km

En la figura **3-4** se muestran los espectros ópticos para una transmisión a 75 GHz a 80 km y como en el caso de los 60 GHz, no se muestra diferencia entre los espectros con CD y sin CD.



**Figura 3-5:** Espectros ópticos tonos simples a 100 GHz en 80 km

La figura **3-5** muestra los espectros ópticos para una transmisión a 100 GHz y el espectro con CD y sin CD muestran el mismo comportamiento al igual que en la transmisiones con portadoras de frecuencia menores y a diferentes distancias.

Debido a que en el dominio de la frecuencia no se mostró un efecto notorio en el espectro óptico a causa de la dispersión cromática, se analizaron las señales ópticas en el dominio del tiempo observando una trama del tono simple transmitido. En la figura **3-6** se muestran las ondas senoidales de una transmisión a 60 GHz en el dominio óptico donde se evidencia un desfase producto de la dispersión cromática, estas señales se simularon sin atenuación en la fibra, no obstante a 40 km se ve una onda distorsionada comparada con la onda sin CD, dicha distorsión no es evidente en el dominio de la frecuencia.

En la figura **3-7** se muestran las señales ópticas en el tiempo de una transmisión a 75 GHz donde se observa como a 40 km se tiene un desfase de 180 grados comparando la onda con CD con la onda sin CD de 180 grados, y como a 80 km el desfase no existe, lo que permite inferir que existe un desfase que cambia con respecto a la longitud de la fibra y podría comportarse cíclicamente debido a la CD.

Para el caso de los 100 GHz en la figura **3-8** se muestran las ondas desfasadas para las distancias de 40 km y 80 km, lo que demuestra que el desfase no sólo depende de la distancia de transmisión, pero sí muestra una onda con menor amplitud a los 40 km para las transmisiones simuladas con diferentes portadoras de RF, efecto producido por la CD, la cual varía la potencia de la señal dependiendo de diferentes parámetros como la longitud de la fibra y

la frecuencia de la portadora [67], por eso se evidencia en algunos casos mayor atenuación a 40 km que a 80 km.

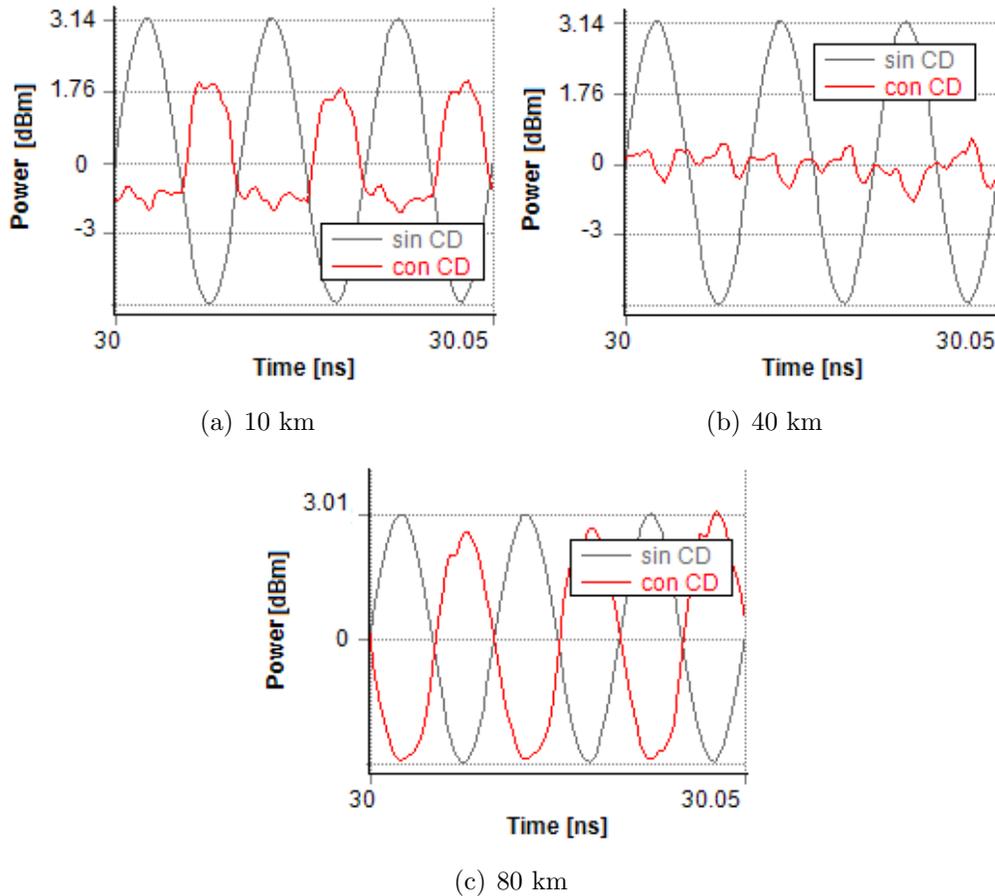


Figura 3-6: Comportamiento óptico en el tiempo de tonos simples a 60 GHz

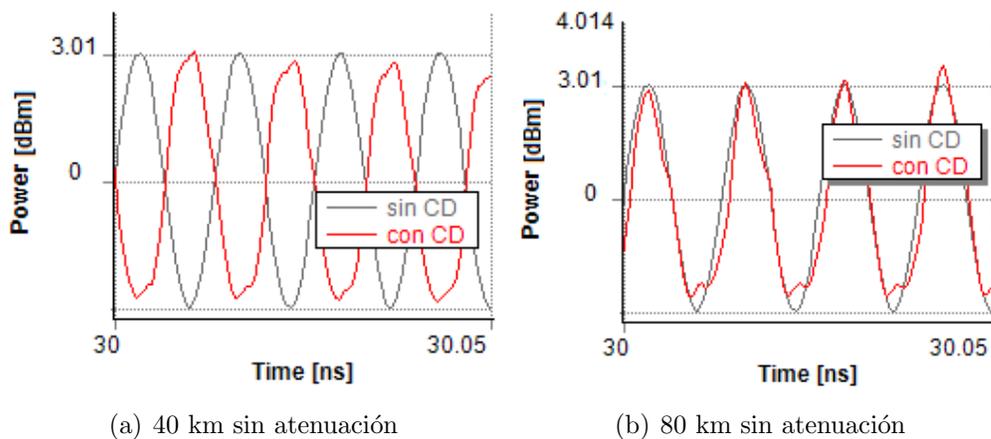


Figura 3-7: Comportamiento óptico en el tiempo de tonos simples a 75 GHz

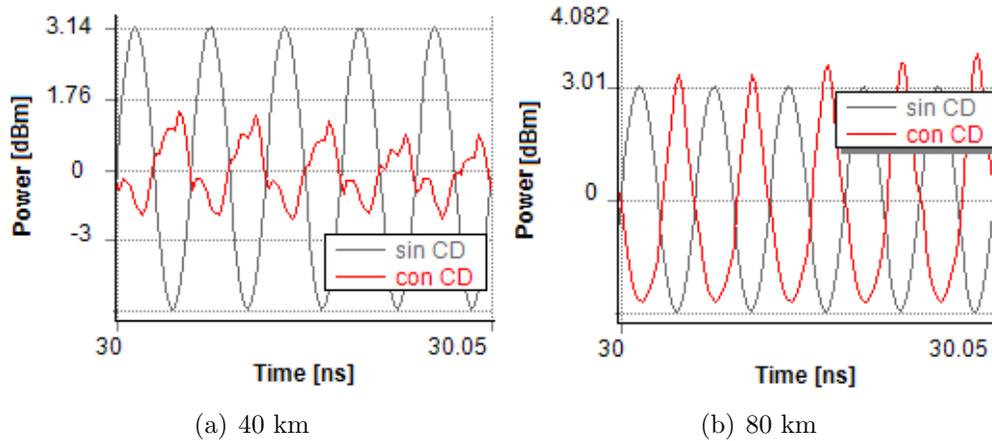


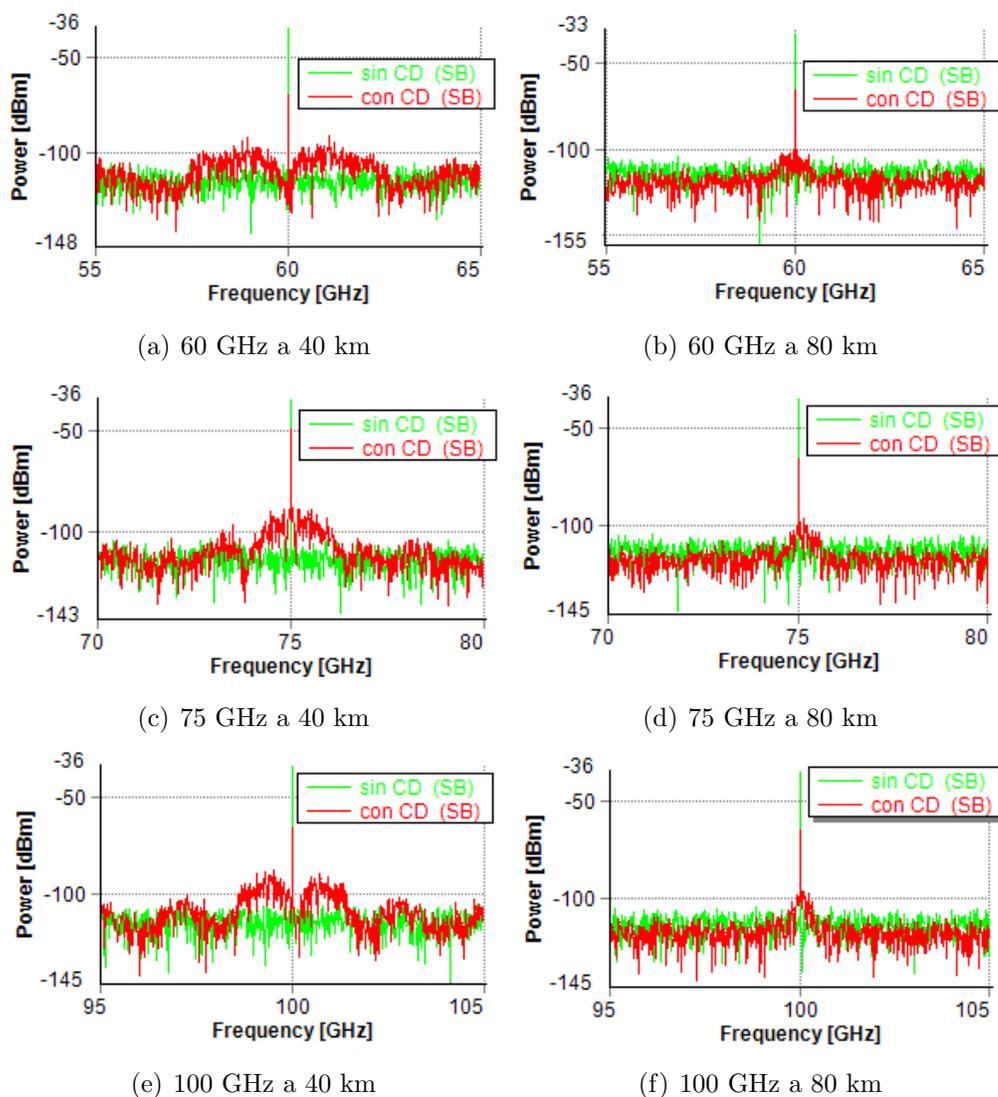
Figura 3-8: Comportamiento óptico en el tiempo de tonos simples a 100 GHz

### 3.2. Análisis espectral de transmisión de tonos simples y modulación de amplitud en el dominio eléctrico

Se analizará la señal transmitida a través de la fibra óptica en el dominio eléctrico, mediante la obtención de los espectros del esquema de la figura 3-1 con iguales parámetros que en la sección anterior, convirtiendo la señal óptica a eléctrica por medio de un fotodetector PIN, con un factor de responsividad de 0.9.

En las gráficas de la figura 3-9 se ve un comportamiento similar del espectro para iguales distancias y diferentes frecuencias y se diferencian de los espectros ópticos al presentarse ciertas distorsiones armónicas y pérdidas de potencia. La figura 3-9(a) presenta una pérdida de potencia en la frecuencia central de 33 dBm entre el espectro sin CD y con CD, además el espectro con CD genera una armónicos a 58 GHz y 62 GHz con un potencia menor a la frecuencia central de unos 25 dBm, para 80 km (figura 3-9(b)) no se evidencian los armónicos cercanos a la frecuencia central de 60 GHz, y la potencia perdida es de aproximadamente 29 dBm.

En la figura 3-9(c) se muestra el espectro de potencia RF a 75 GHz, la pérdida de potencia en la frecuencia central de 16 dBm, un valor menor que para el caso de 60 GHz a igual distancia, también se pueden ver unos armónicos en 73.4 GHz y 76.9 GHz, con una potencia de -97 dBm, equivalente a una diferencia con respecto a la frecuencia central de 47 dBm menos.

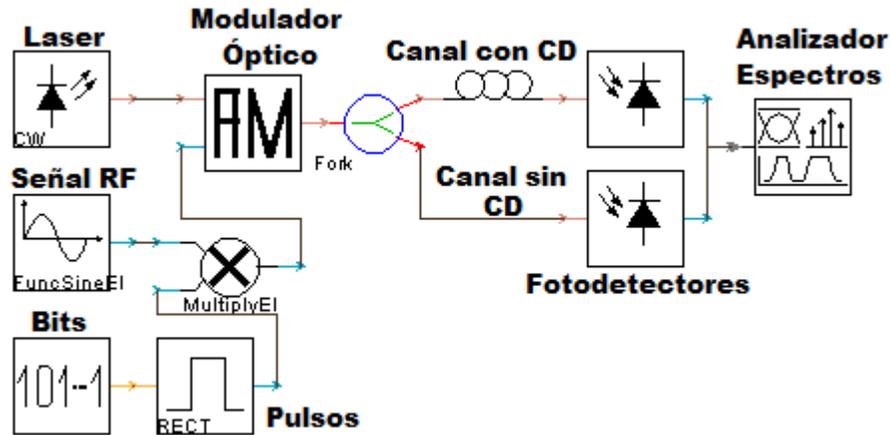


**Figura 3-9:** Espectros RF tonos simples IM/DD

Ahora para 80 km a 75 GHz, en la figura 3-9(d) se muestra una pérdida de potencia en la frecuencia central de 34.57 dBm y no se tienen armónicos cercanos a la frecuencia central como en el caso de los 60 GHz a 80 km. En la figura 3-9(e) se muestra el espectro RF para una transmisión a 100 GHz a 40km, el espectro con CD muestra una pérdida de 22 dBm en relación al espectro sin CD, y tienen armónicos en 99.4 y 100.6 GHz con una potencia de -87 dBm que equivale a una diferencia de 21 dBm en comparación a la frecuencia central. Para 100 GHz a 80 km se ve en la figura 3-9(f) una diferencia en potencia entre el espectro RF con CD y sin CD de 32 dBm.

Ahora se hará un análisis similar al de la transmisión de tonos simples, pero esta vez con modulación en amplitud OOK (on - off keying) de no retorno a cero (NRZ, non-return-zero)

a 1 Gbps con el sistema RoF de la figura 3-10.

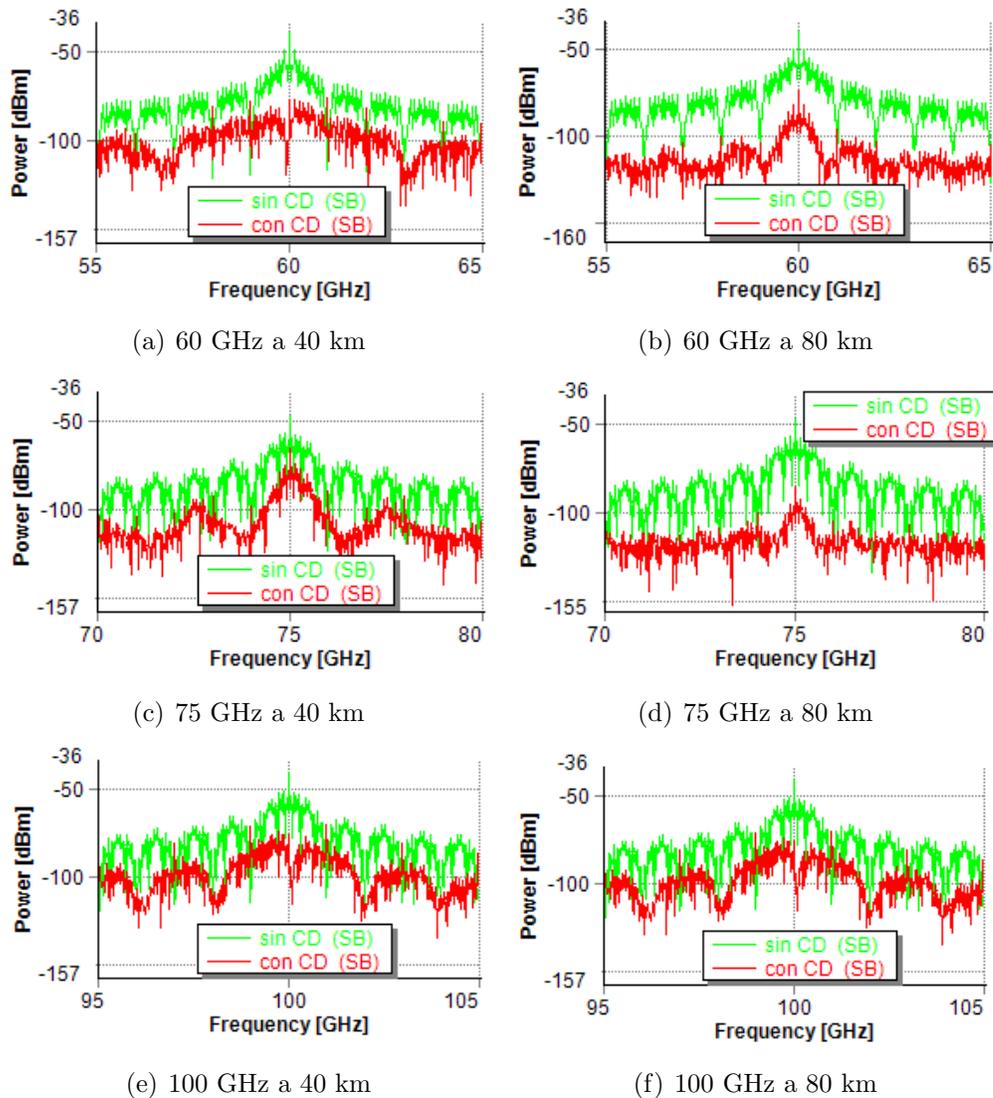


**Figura 3-10:** Sistema de transmisión IM/DD con modulación NRZ-OOK

La figura 3-11(a) a 60 GHz en 40 km, presenta una atenuación del espectro con CD de 37 dBm con respecto al espectro sin CD (-41 dBm espectro sin CD y -78 dBm con CD, además se ven varios armónicos que se repiten cada 1 GHz de diferencia de la frecuencia central de 1 GHz, con potencias superiores que la central en 4 dBm para los armónicos de 59 GHz y 61 GHz, y superior en 1 dBm para los armónicos de 58 GHz y 62 GHz. La figura 3-11(b) a 60 GHz en 80 km muestra un espectro sin CD con potencia de -40.5 dBm en la frecuencia central, y un espectro con CD con potencia de -76.2 dBm.

Para una transmisión a 75 GHz, se observa el espectro de potencia a 40 km en la figura 3-11(c) con una potencia en la frecuencia central de -40.5 dBm para el caso sin CD, mientras que con CD la potencia es de -58.48 dBm, para los 80 km (figura 3-11 (d)) la potencia con CD del espectro RF es de -77.8 dBm. Fíjese en la mayor atenuación a mayor distancia en la transmisión a 75 GHz, en el caso de la transmisión a 60 GHz también se cumple pero en sus armónicos cercanos, debido a que a los 40 km en la frecuencia central el espectro mostró más atenuación.

En la figura 3-11(e) y 3-11(f) se muestran los espectros RF para una transmisión a 100 GHz a 40 y 80 km respectivamente, donde en el primer caso el espectro con CD presenta una potencia de -76 dBm, y en el segundo caso de -79.3 dBm. Haciendo una comparación con los espectros sin CD, para 40 km se tiene una pérdida de potencia de 35 dBm, y para 80 km de 26.3 dBm. Se evidencia en el espectro afectado por la CD a 40 km varios armónicos cercanos a la frecuencia central, en 97, 99, 101 y 103 GHz, con potencias de -70 dBm para los armónicos de 99 y 101 GHz, valores superiores al medido en la frecuencia central de 100 GHz.



**Figura 3-11:** Espectros RF NRZ-OOK IM/DD

Comparando los espectros NRZ-OOK con los espectros de tonos simples se puede evidenciar que la potencia en la frecuencia central es similar en ambos, y que además se tiene mayor potencia en la transmisión a 75 GHz. En transmisión de tonos simples se observaban ciertos armónicos cercanos a la frecuencia central para transmisiones a 40 km y no para 80 km, para la transmisión NRZ-OOK si se observaban armónicos para ambas distancias.

Los armónicos generados en los espectros eléctricos se deben a que el chirp de la señal óptica combinado con la dispersión de la fibra, causa distorsiones armónicas cuando la señal es fotodetectada [69]. El campo eléctrico de la salida del modulador óptico puede describirse matemáticamente por medio de series de Fourier, donde cada componente de este campo viajando a través de la fibra óptica se ve afectada por la CD, generando cambios de fase

según la ecuación (2-3), que al ser convertidas al dominio eléctrico por el fotodetector, se encuentra que la influencia de la CD de la fibra está en el segundo armónico de la señal fotodetectada [70] y está determinada según los parámetros de cada transmisión de acuerdo al comportamiento cíclico de la CD expuesto en el capítulo 2.

### 3.3. Cálculo de la magnitud de error vectorial mediante transmisiones BPSK en RF

El sistema RoF de la figura 3-12 modula eléctricamente la fase de la portadora de onda milimétrica de forma BPSK (Binary phase shift keying) para luego ser modulada en intensidad por un modulador óptico ideal que está conectado a un laser de onda continua con longitud de onda de 1550 nm, con un ancho espectral de 10 MHz.

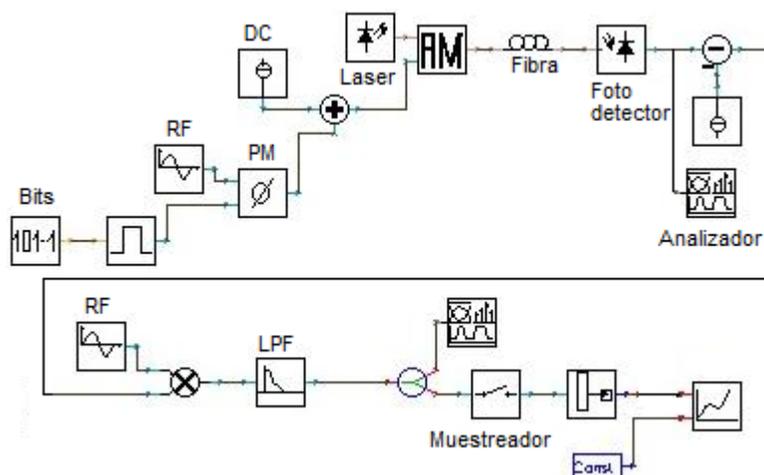


Figura 3-12: Sistema RoF con modulación BPSK

Para la detección de la señal, primero se realiza la conversión opto-eléctrica, y se procede a realizar la demodulación multiplicando la señal recibida por la misma señal de la portadora, y se detecta la envolvente por medio de un filtro Bessel pasa bajos de cuarto orden. Finalmente se muestrea la señal obteniendo el diagrama de constelación.

La magnitud de error vectorial (EVM, error vector magnitude) es una medida porcentual del rendimiento para evaluar la calidad de comunicación en los sistemas modulados en fase. Esta cantidad es una medida de los errores entre los símbolos recibidos y los símbolos que se esperaban recibir en el diagrama de constelación. Mediante la constelación de una señal se puede observar la amplitud y la fase del mismo, un diagrama de constelación es una representación de un esquema de modulación digital en el plano complejo. Los ejes real e imaginario suelen ser llamados I (por In-phase) y Q (por quadrature).

Existe un rango de valores porcentuales de EVM según estándares IEEE (802.11a/b/g) y ETSI (GSM, UMTS, entre otros) [71], que permiten evaluar la calidad del sistema de comunicación usado. Para resultados experimentales se puede usar el criterio del 10% de EVM para diferentes formatos de modulación [72]. La referencia [73], indica un buen desempeño de un modulador BPSK con un EVM menor a 9.5 %.

El EVM se define matemáticamente de acuerdo al estándar de la IEEE 802.11<sup>a</sup> [17] como en la ecuación 3-1

$$EVM_{RMS} = \left[ \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |I_t - I_{0,t}|^2 + |Q_t - Q_{o,t}|^2}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |I_{0,t}|^2 + |Q_{o,t}|^2} \right] \quad (3-1)$$

Donde I y Q son las componentes en fase y cuadratura respectivamente de los símbolos previamente normalizados. La normalización se obtiene al dividir la potencia en cada símbolo, por la potencia promedio calculada en todos los símbolos en la constelación [74]. Para el caso de la modulación BPSK, la componente Q es nula.

Se hace un análisis comparativo de la EVM para una transmisión a 1 Gbps con portadoras de 60, 75 y 100 GHz para 4 longitudes de fibra diferente (40, 60, 80 y 100 km). En la figura 3-13 se muestran los diagramas de constelación para una portadora de 60 GHz y se ve como a 40 km la constelación se distorsiona y los puntos se acercan a cero, sin embargo, para las distancias superiores aparecen nuevas agrupaciones de puntos, por ejemplo a 100 km se muestran 3 grupos de puntos, uno alrededor de 0 y los otros 2 a 1 y -1, lo que significa que se generaron nuevos niveles en la señal recibida. Esto mismo comportamiento se puede observar en las figuras 3-14 y 3-15.

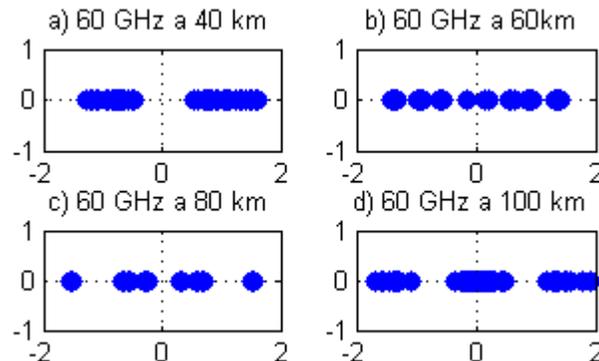
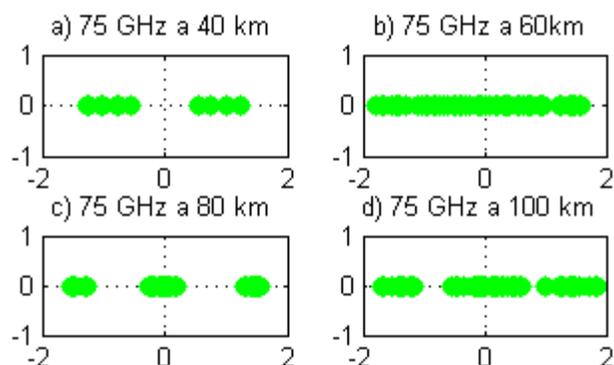
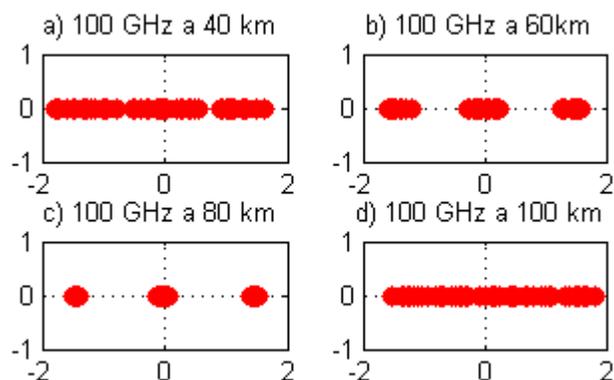


Figura 3-13: Constelación 1 Gbps a 60 GHz



**Figura 3-14:** Constelación 1 Gbps a 75 GHz



**Figura 3-15:** Constelación 1 Gbps a 100 GHz

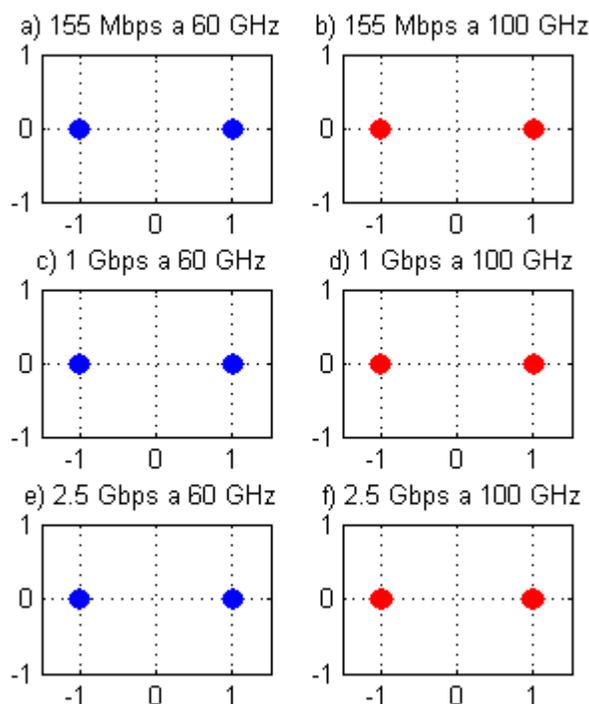
El porcentaje de EVM aumenta en relación al aumento de la distancia de transmisión para los 60 GHz, pero para 75 GHz se tiene un valor de EVM mayor a 80 km que a 100 km, el mismo caso que para 100 GHz, donde se obtienen valores de EVM similares para 100 km y 40 km, y más elevado el valor de EVM para 60 y 80 km. Los valores porcentuales del EVM se pueden ver en la tabla **3-1**

**Tabla 3-1:** Porcentaje de EVM sistema RoF BPSK a 1 Gbps

Freq.-Distancia	40 km	60 km	80 km	100 km
60 GHz	27.0307	41.2905	54.0093	68.3031
75 GHz	24.02	54.1593	72.7302	65.6719
100 GHz	55.95	71.5392	76.5844	50.662

Ahora se analizarán los diagramas de constelación para distancias de 2, 50 y 100 km para

velocidades de transmisión de 155 Mbps, 1 y 2.5 Gbps y se calculará el valor de la EVM. Para el caso de 2 km se tienen porcentajes de EVM que no superan el 1.1 % (tabla **3-2**) así para todas las velocidades de transmisión reportadas no se muestran distorsiones relevantes en el diagrama de constelación mostrado en la figura **3-16**.

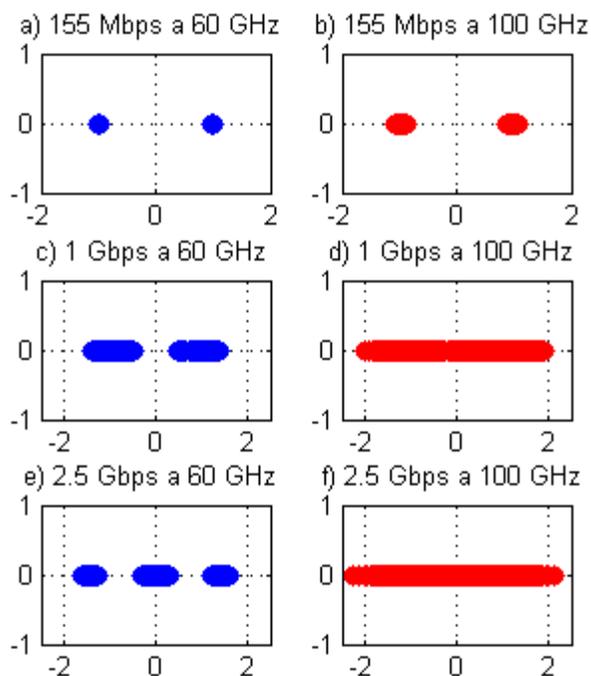


**Figura 3-16:** Diagrama de constelación BPSK para una distancia de 2 km

**Tabla 3-2:** EVM para una longitud de la fibra de 2 km

Velocidad Tx.	60 GHz	100 GHz
155 Mbps	0,6818	0,7663
1 Gbps	0,6545	0,7508
2,5 Gbps	0,6632	1,0946

El cálculo de la EVM de la constelación a 50 km se puede ver en la tabla **3-3**. Los porcentajes de EVM muestran un incremento en su valor a mayores velocidades de transmisión, y en el caso de 2.5 Gbps, la portadora de 100 GHz exhibe un mejor desempeño del EVM en comparación con la portadora de 60 GHz.



**Figura 3-17:** Diagrama de constelación BPSK para una distancia de 50 km

**Tabla 3-3:** EVM para una longitud de la fibra de 50 km

Velocidad Tx.	60 GHz	100 GHz
155 Mbps	0,8407	3,6872
1 Gbps	27,1548	40,5684
2,5 Gbps	75,1889	42,1506

**Tabla 3-4:** EVM para una longitud de la fibra de 100 km

Velocidad Tx.	60 GHz	100 GHz
155 Mbps	5,0029	14,808
1 Gbps	59,2169	37,0191
2,5 Gbps	57,885	39,0566

A 155 Mbps no se tiene gran diferencia de la transmisión a 2 km y 50 km, para velocidades superiores ya se tiene una diferencia grande en el porcentaje de la EVM entre estas distancias, logrando una EVM del 40,5 % para transmisiones de 2.5 Gbps a 100 GHz.

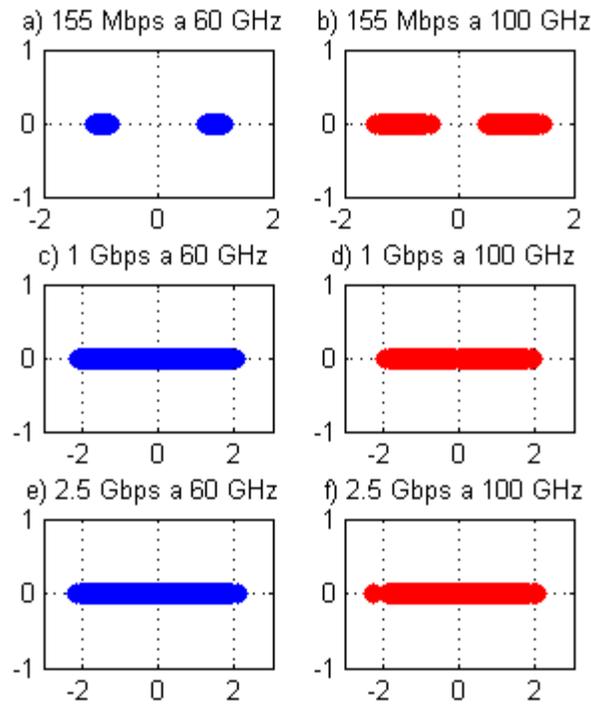


Figura 3-18: Diagrama de constelación BPSK para una distancia de 100 km

### 3.4. Cálculo de la tasa de error de bit

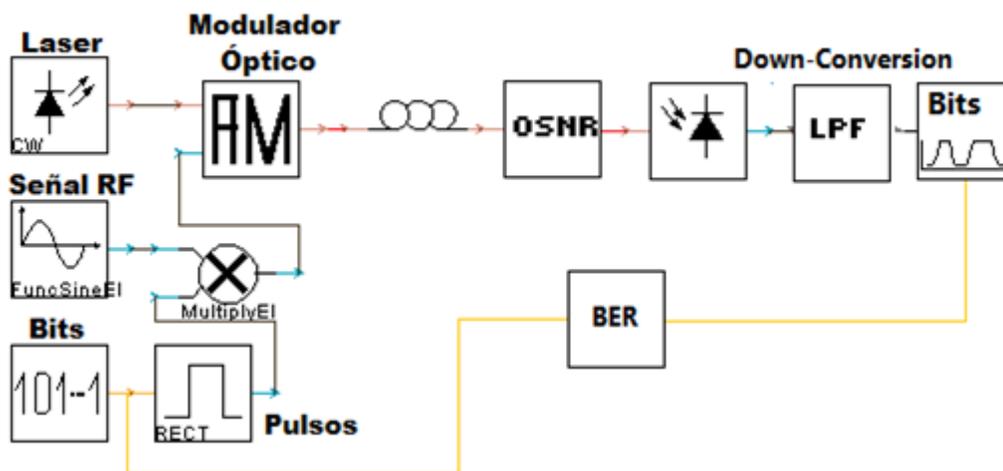
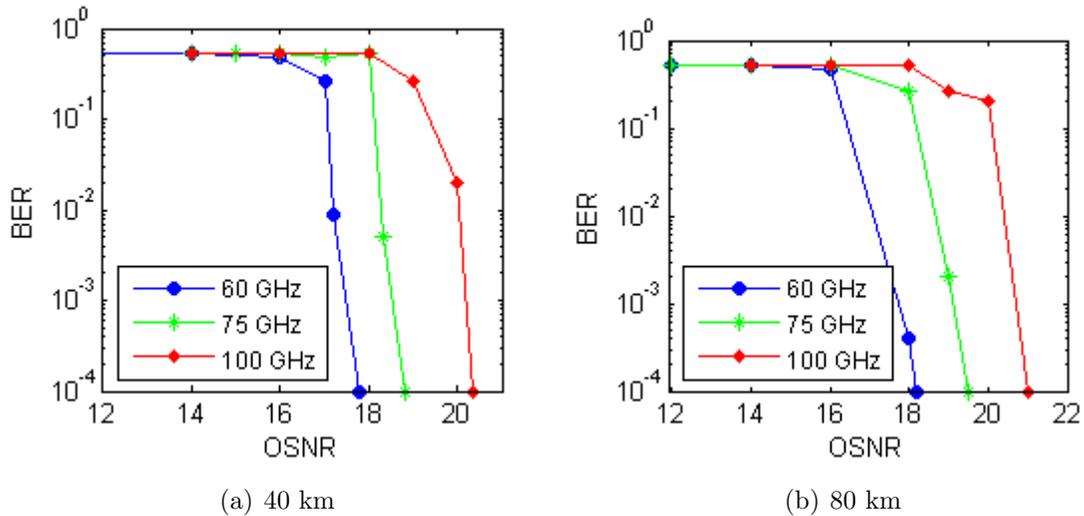


Figura 3-19: Sistema RoF NRZ-OOK para el cálculo del BER

Para obtener una medida del efecto de la dispersión cromática en estos sistemas se varía la

relación señal a ruido óptica (OSNR, optical signal to noise ratio) y se calcula la tasa de error de bit (BER, bit error rate) para diferentes valores de OSNR. Las curvas BER vs. OSNR de la figura **3-20** y **3-21** se estimaron de manera heurística en el software VPI, calculando el BER mediante la comparación de los bits recibidos y los bits transmitidos en el sistema de la figura **3-19** para diferentes valores de OSNR y haciendo el conteo de errores en cada transmisión. Se usó un modulador óptico con parámetros ideales, permitiendo la modulación de intensidad de un laser de onda continua en la ventana de los 1550 nm con un ancho espectral de 10 MHz. Se usó fibra SMF estandar con factor de dispersión de 16 ps/nm.km y atenuación de 0.2 dB/km, y un fotodetector PIN con factor de responsividad de 1.



**Figura 3-20:** Curvas BER vs. OSNR a 250 Mbps en NRZ

En la figura **3-20(a)** se muestran las curvas BER vs. OSNR para una transmisión a 250 Mbps a 40 km y en la figura **3-20(b)** a 80 km para frecuencias de portadora de 60, 75 y 100 GHz. Se nota como el BER aumenta en relación al incremento de la frecuencia de la portadora para ambos casos, siendo mayor para la transmisión a 80 km pero en menos de 1 dB. Para una transmisión de 1 Gbps a 40 km se ve en la figura **3-21(a)** unas curvas similares a las obtenidas en la figura **3-20(b)** con el mismo BER pero con una OSNR un poco mayor en menos de 0.2 dB para cada frecuencia de portadora, para los 80 km (**3-21(b)**) se nota un leve aumento de la BER.

En la figura **3-22** se muestra el esquema del sistema en banda base con el que se estimaron las curvas de la figura **3-23**, para el sistema RoF se usó el mismo esquema, sólo cambiando la modulación y la demodulación de la señal para BPSK en RoF como se expuso en la sección anterior para el cálculo de la EVM. En este esquema se tiene un generador de ruido blanco gaussiano conectado a un atenuador variable, con este dispositivo se varía la potencia del

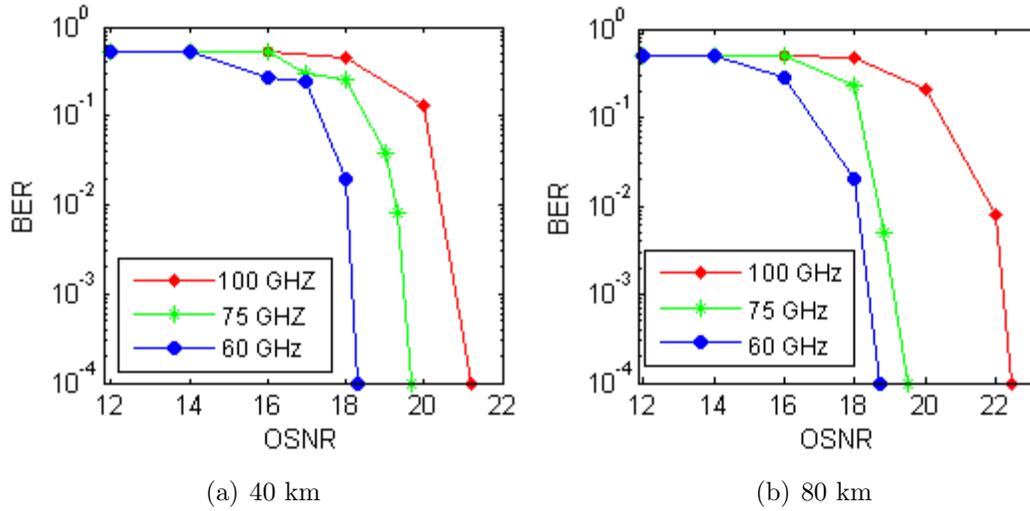


Figura 3-21: Curvas BER vs. OSNR a 1 Gbps

ruido que entra al canal de transmisión. Se tienen 2 dispositivos de medida de potencia, uno para el ruido y otro para la señal, con esto se obtiene la relación señal a ruido óptica y se muestra en decibeles, calculando el BER para cada una de las variaciones del ruido usando una estimación probabilística con una distribución gaussiana.

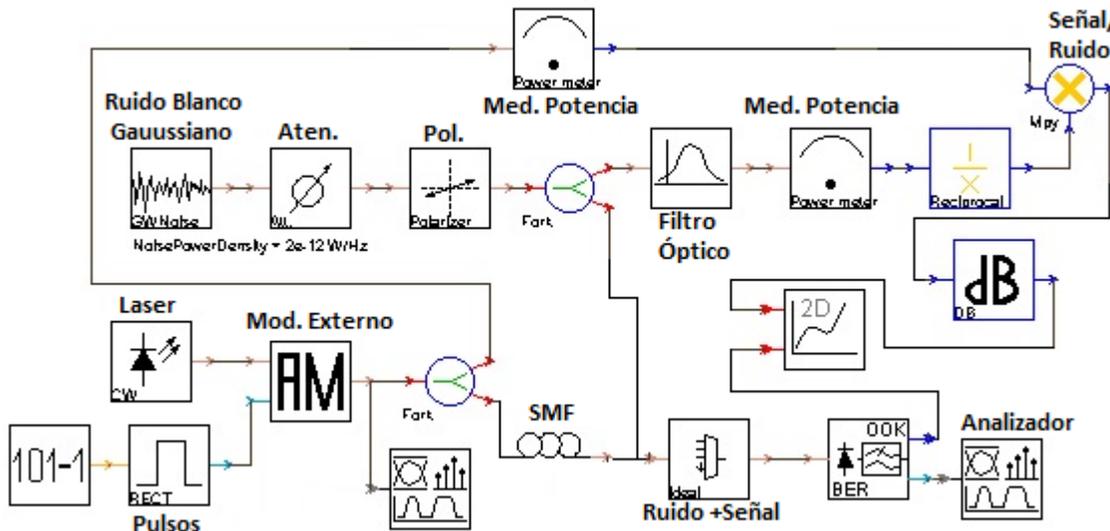
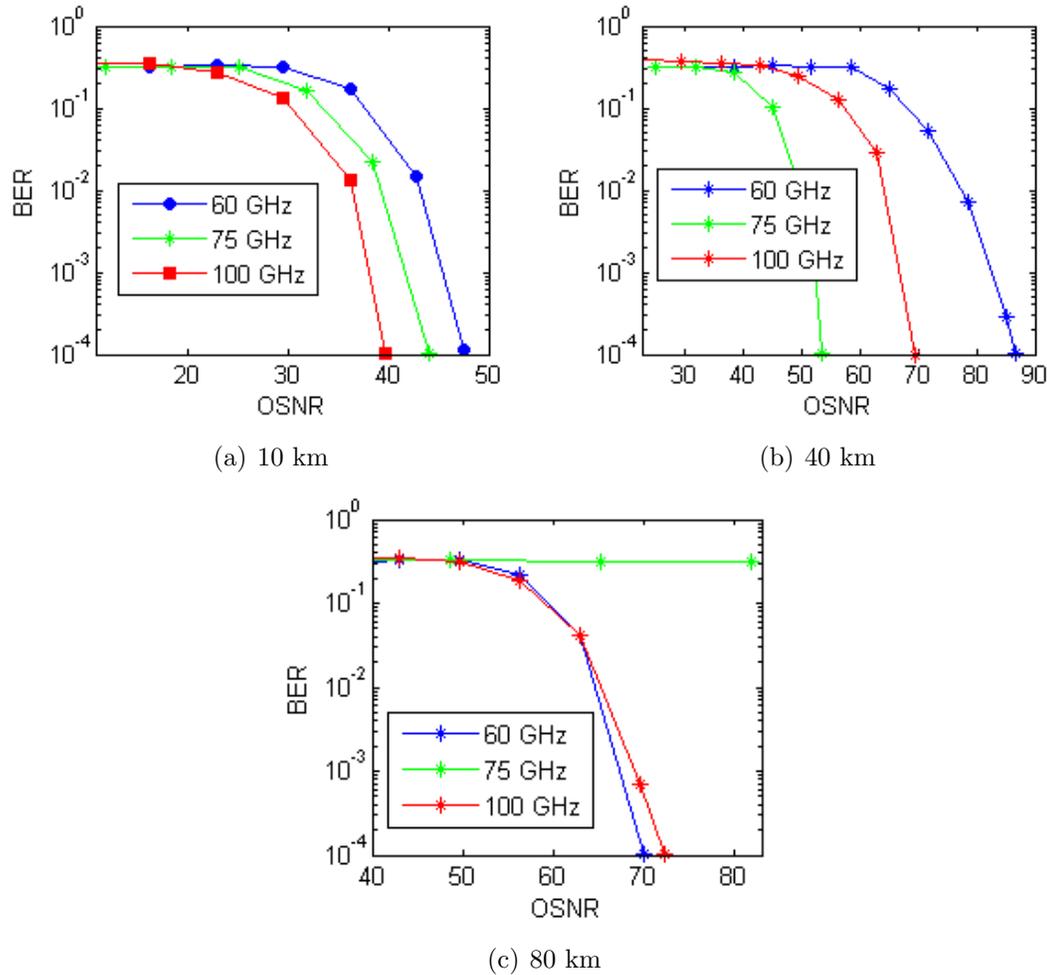


Figura 3-22: Sistema BB para el cálculo del BER

En la figura 3-23 se muestran las curvas BER vs. OSNR para una transmisión a 250 Mbps en BPSK con distancias de 10, 40 y 80 km, es evidente que se tiene poca tolerancia al ruido en este sistema BPSK, siendo más notorio a mayores longitudes de fibra, además, el BER



**Figura 3-23:** Curvas BER vs. OSNR BPSK a 250 Mbps en RoF

no aumenta en relación al incremento de la frecuencia de la portadora como en el caso NRZ, a 80 km presenta mayor BER a 75 GHz y menor BER a 60 GHz, mientras que para el caso de 40 km el mayor BER se presenta a 60 GHz y menor BER a 75 GHz, en 10 km también se tiene mayor BER a 60 GHz y menor BER a 100 GHz.

Las figuras 3-24(a) y 3-24(b) son muy similares, sin embargo se observa un leve aumento en el BER a 1 Gbps con respecto a 155 Mbps. El aumento es más significativo en la figura 3-24(c) a una velocidad de transmisión de 2,5 Gbps. Se alcanzó una BER de  $1e-9$  para una OSNR de 17 dB a 155 Mbps y de 19 dB a 2,5 Gbps en 40 km.

Se demuestra en la medición del BER que los sistemas en banda base son más tolerantes al ruido óptico que los sistemas de RoF, donde las transmisiones en BPSK se ven muy afectadas.

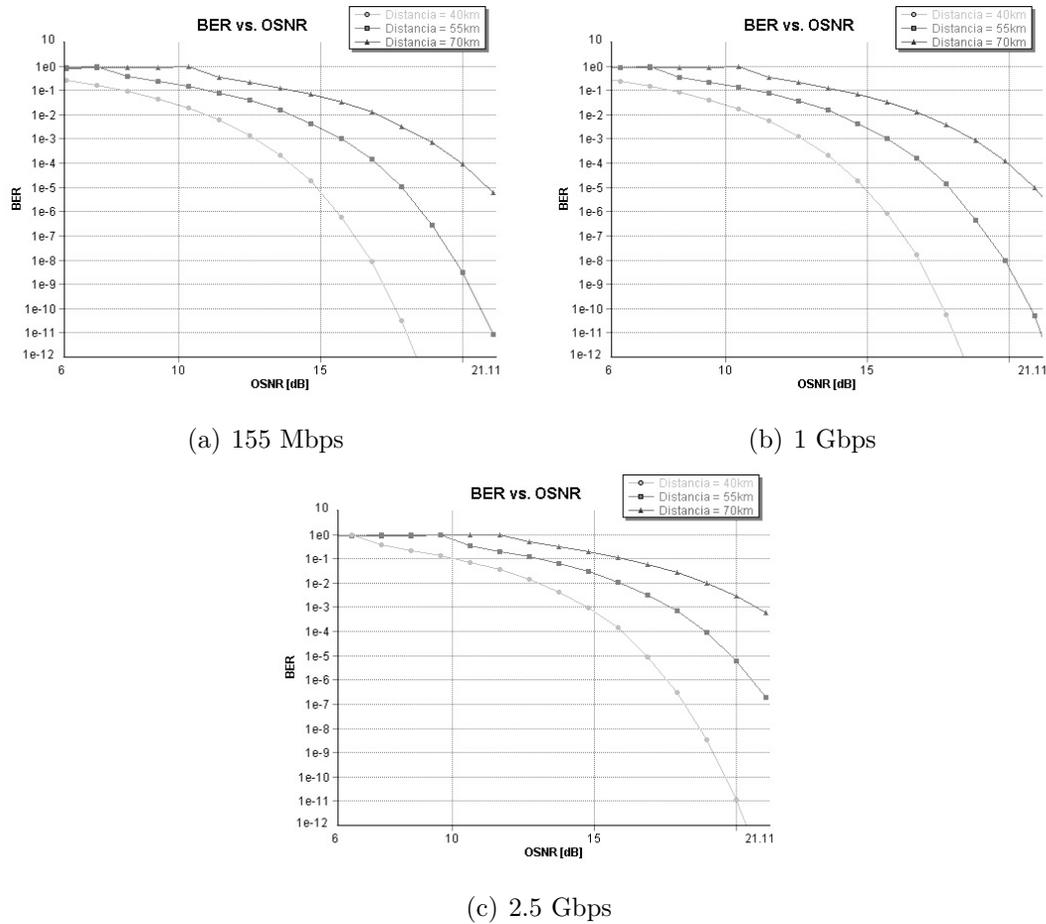
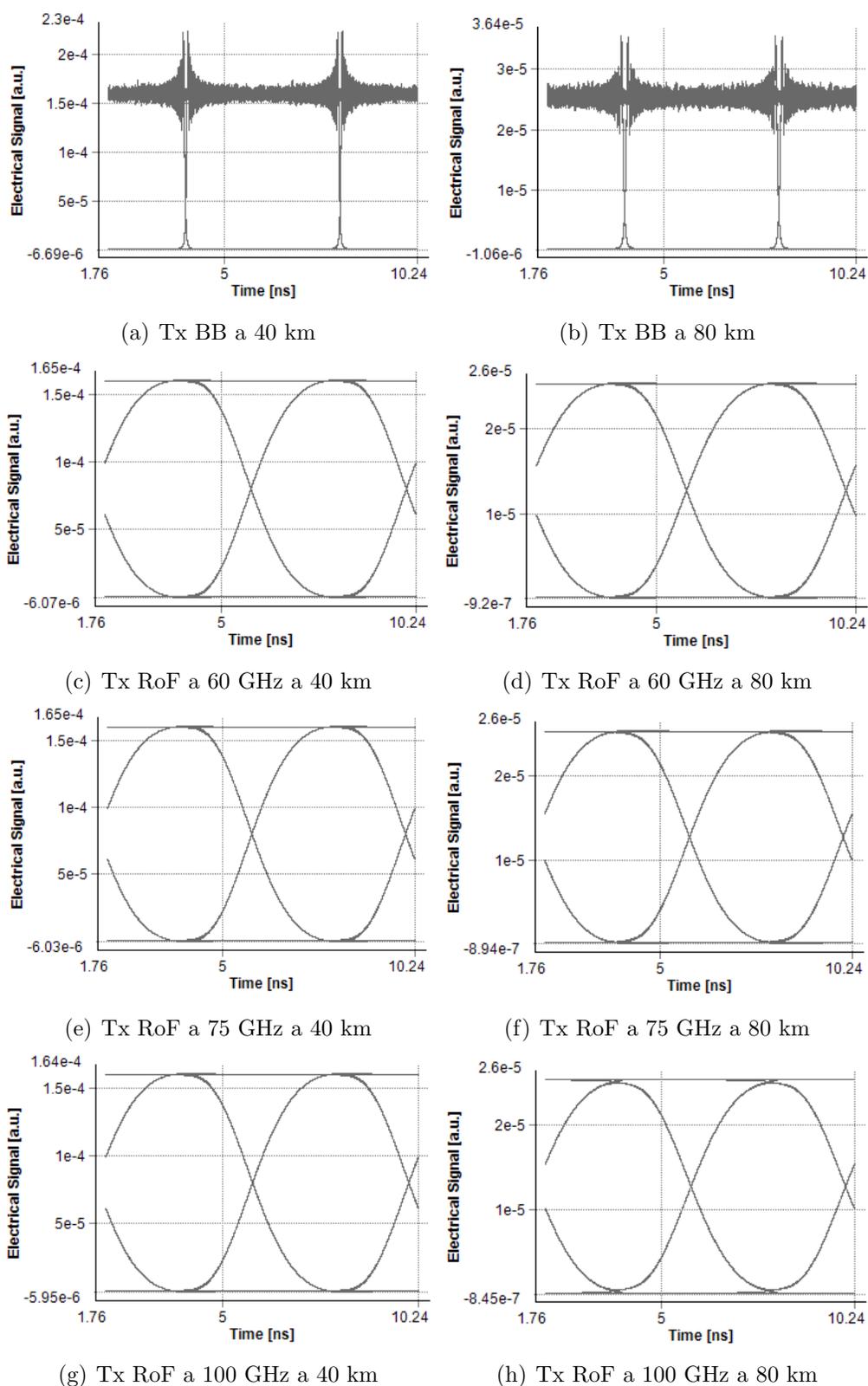
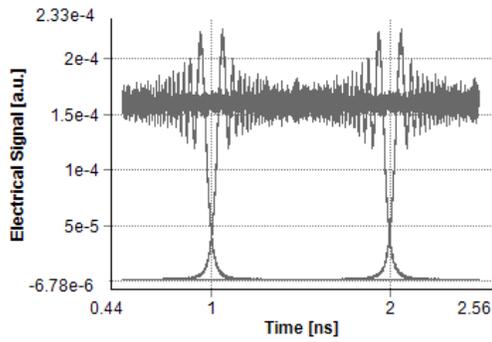


Figura 3-24: Curvas BER vs. OSNR en Banda Base

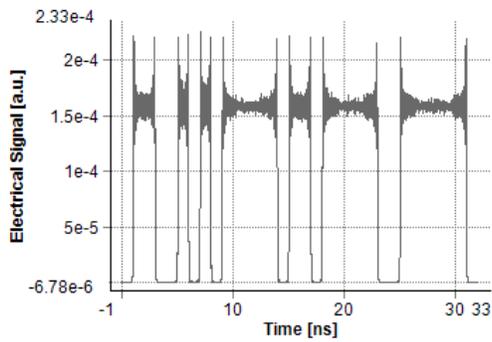
### 3.5. Análisis de la distorsión por medio de diagramas de ojo y pulsos temporales

En esta sección se hará un análisis cualitativo en el dominio temporal de transmisiones con modulaciones NRZ y BPSK en un sistema de RoF y banda base (BB, Base Band) sin ningún tipo de ruido (ni eléctrico ni óptico) para observar mediante diagramas de ojo y pulsos demodulados los efectos de la CD. Se usó un laser de onda continua con un ancho espectral de 10 MHz, transmitiendo en la ventana de los 1550 nm, modulando la intensidad de la luz por medio de un modulatoro óptico ideal. La fibra es monomodo estandar con factor de dispersión de 16 ps/nm.km. El fotodetector es PIN con parámetros ideales (factor de responsabilidad igual a 1), sin ruido de disparo ni térmico.

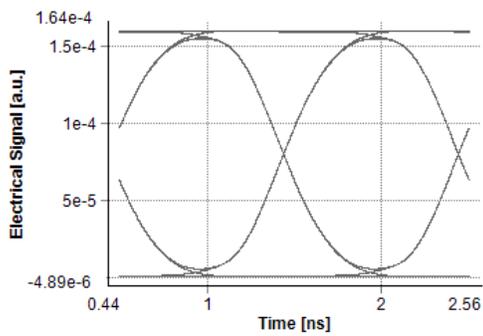
**Figura 3-25:** Diagramas de ojo NRZ a 250 Mbps en BB y RoF



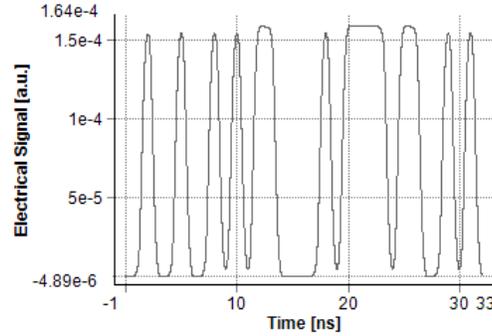
(a) Diagrama de ojo, Tx BB



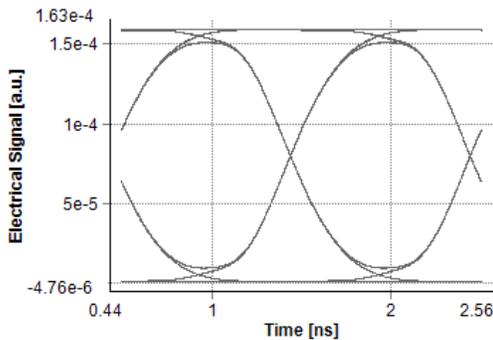
(b) Pulsos recibidos, Tx BB



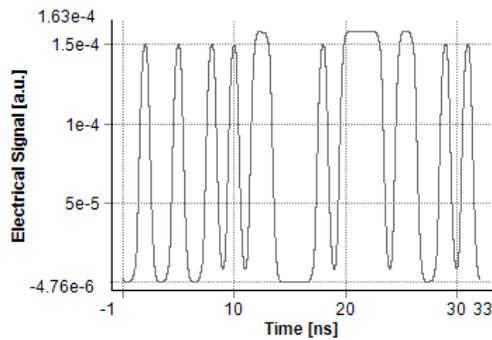
(c) Diagrama de ojo, Tx RoF a 60 GHz



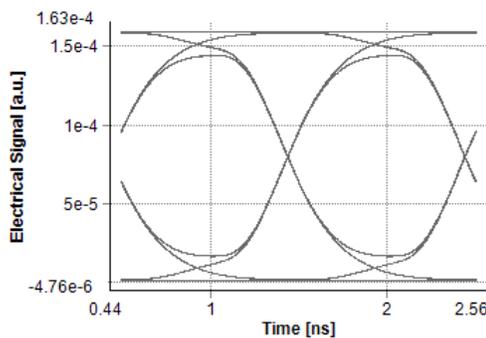
(d) Pulsos recibidos, Tx RoF a 60 GHz



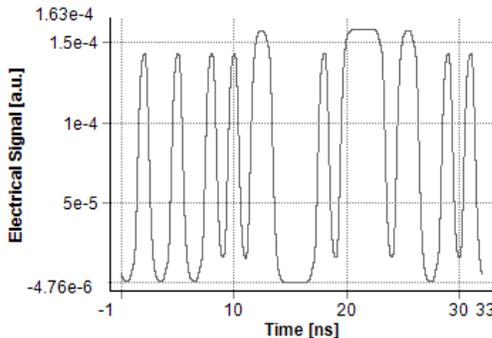
(e) Diagrama de ojo, Tx RoF a 75 GHz



(f) Pulsos recibidos, Tx RoF a 75 GHz

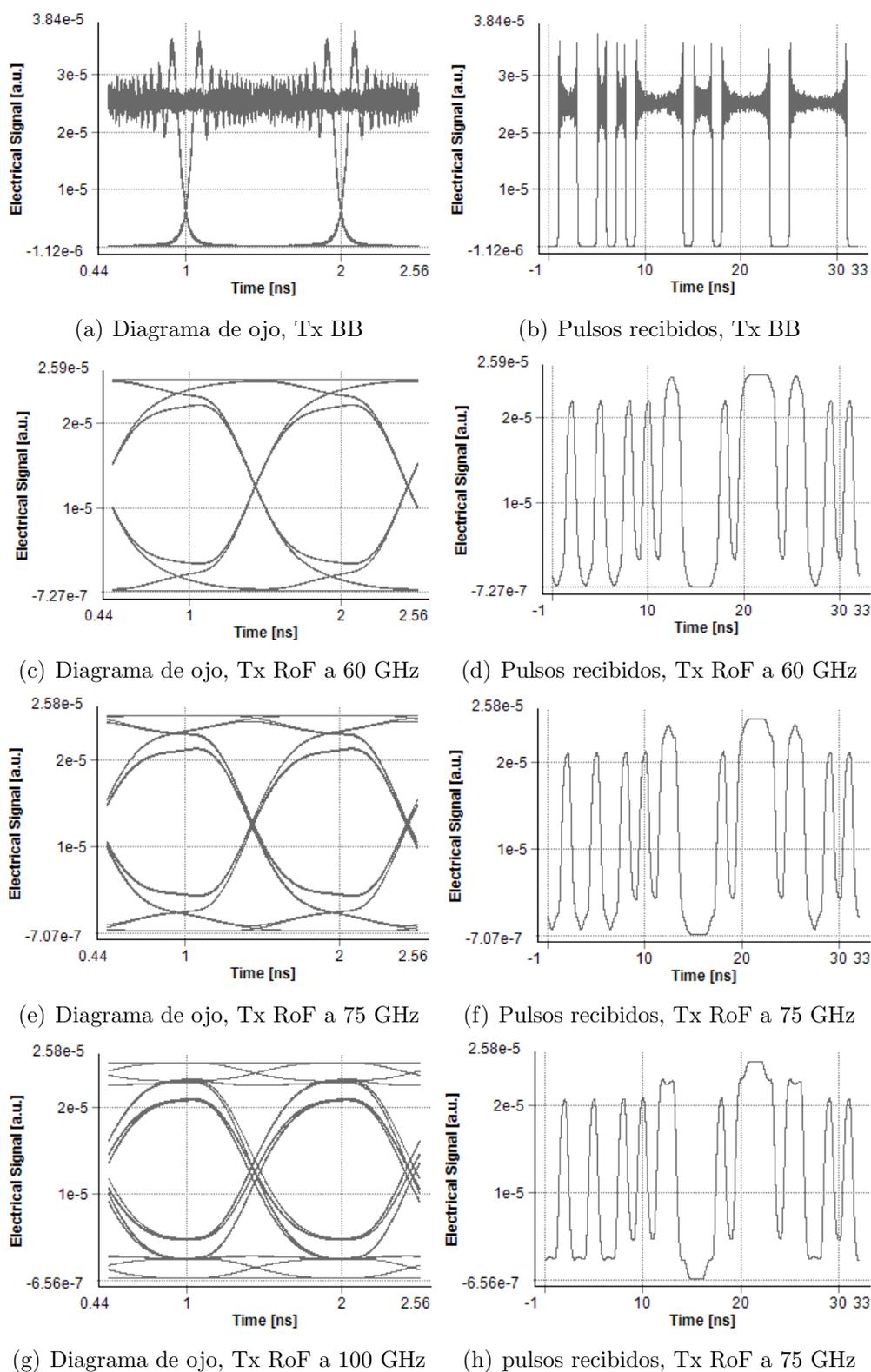


(g) Diagrama de ojo, Tx RoF a 100 GHz

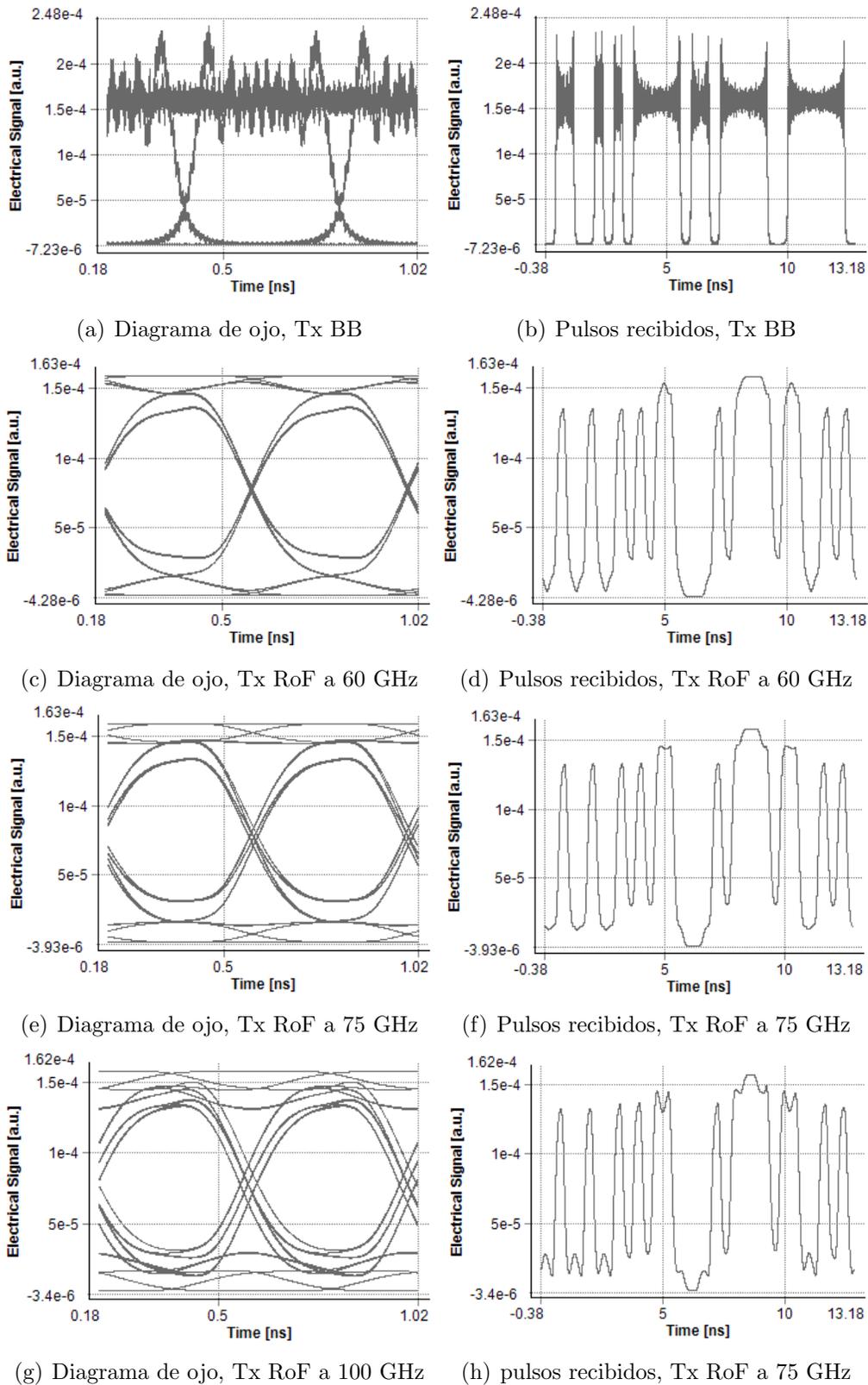


(h) pulsos recibidos, Tx RoF a 75 GHz

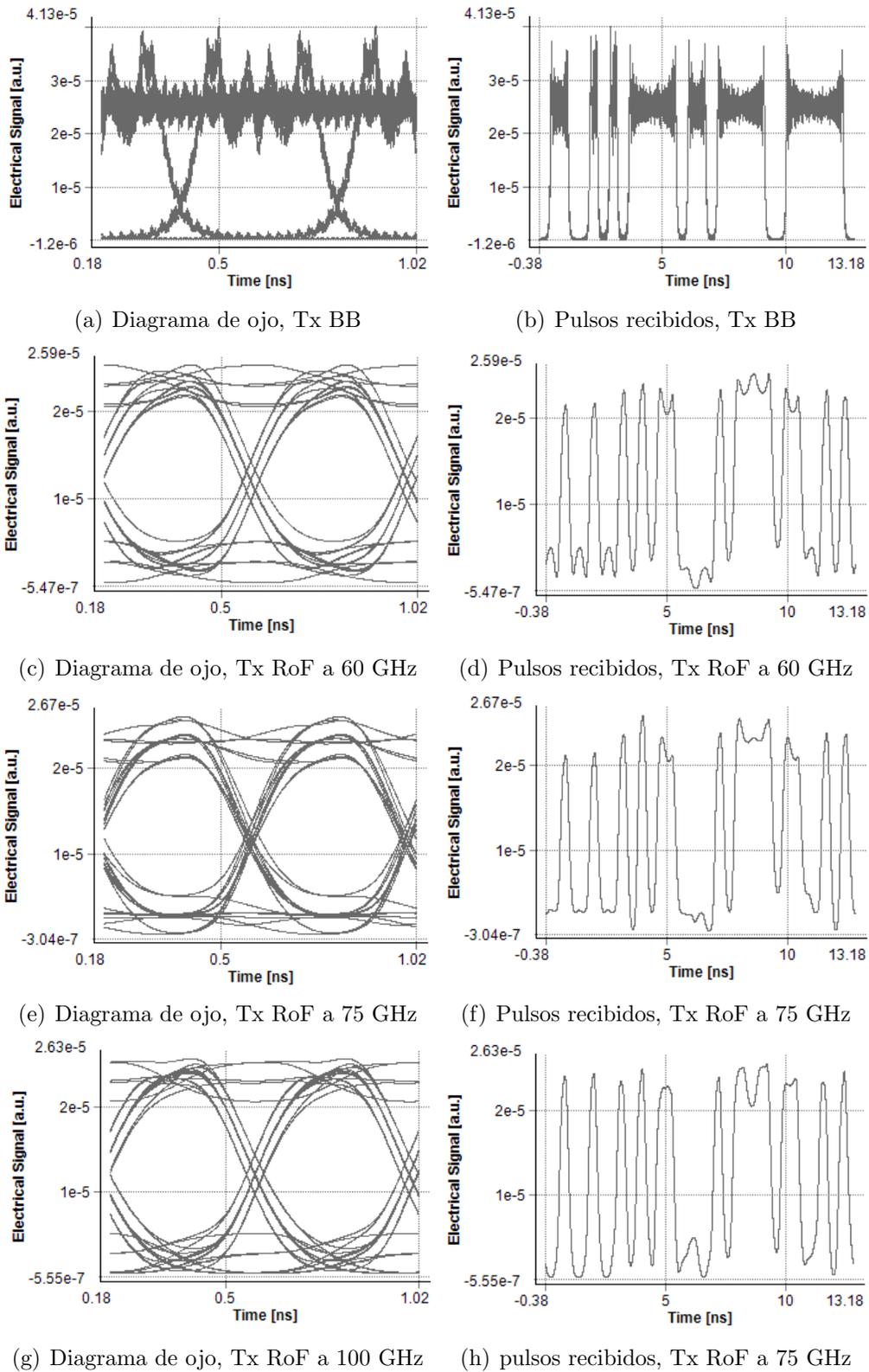
**Figura 3-26:** Transmisiones NRZ a 1 Gbps en BB y RoF a 40 km



**Figura 3-27:** Transmisiones NRZ a 1 Gbps en BB y RoF a 80 km

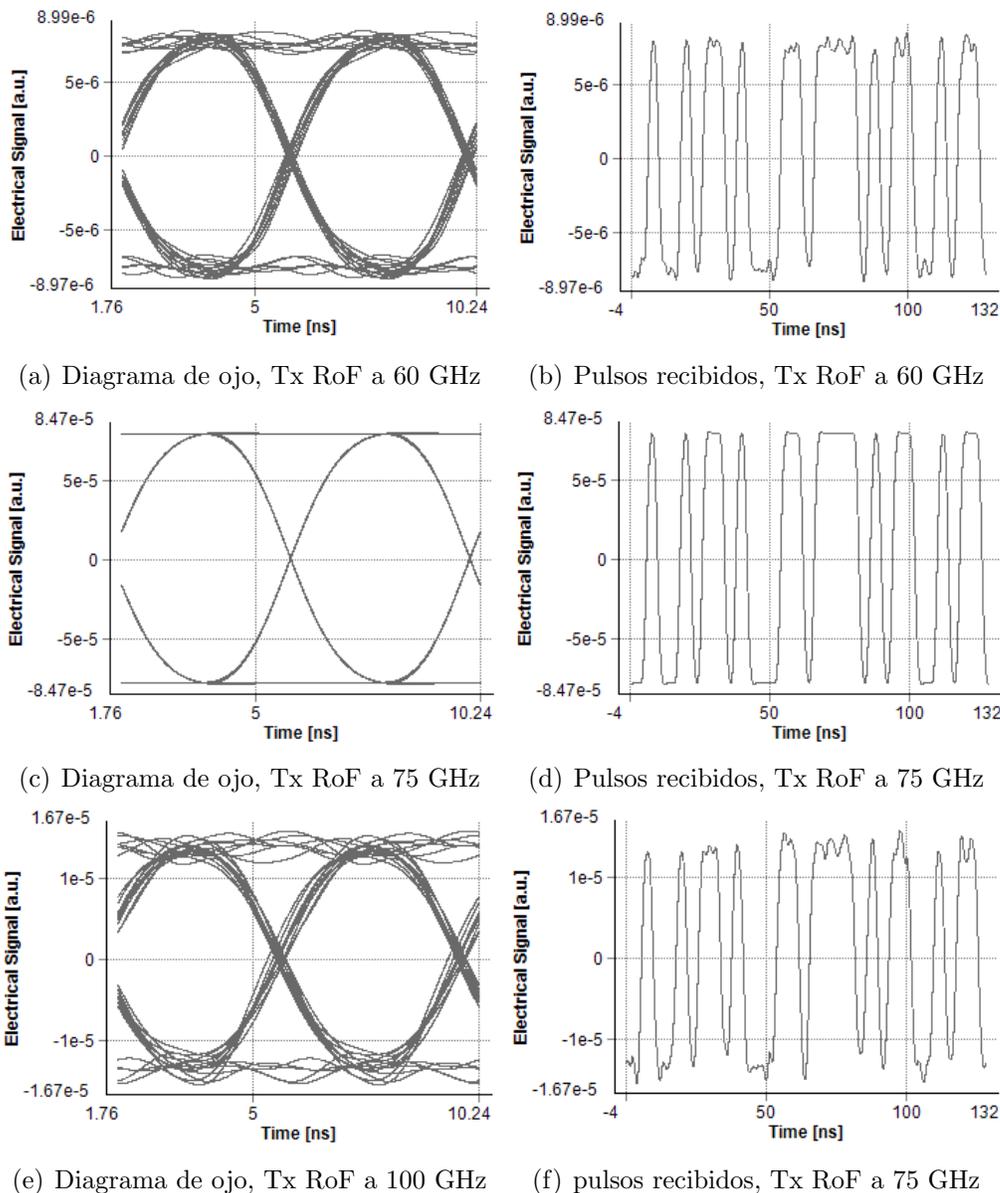


**Figura 3-28:** Transmisiones NRZ a 2.5 Gbps en BB y RoF a 40 km



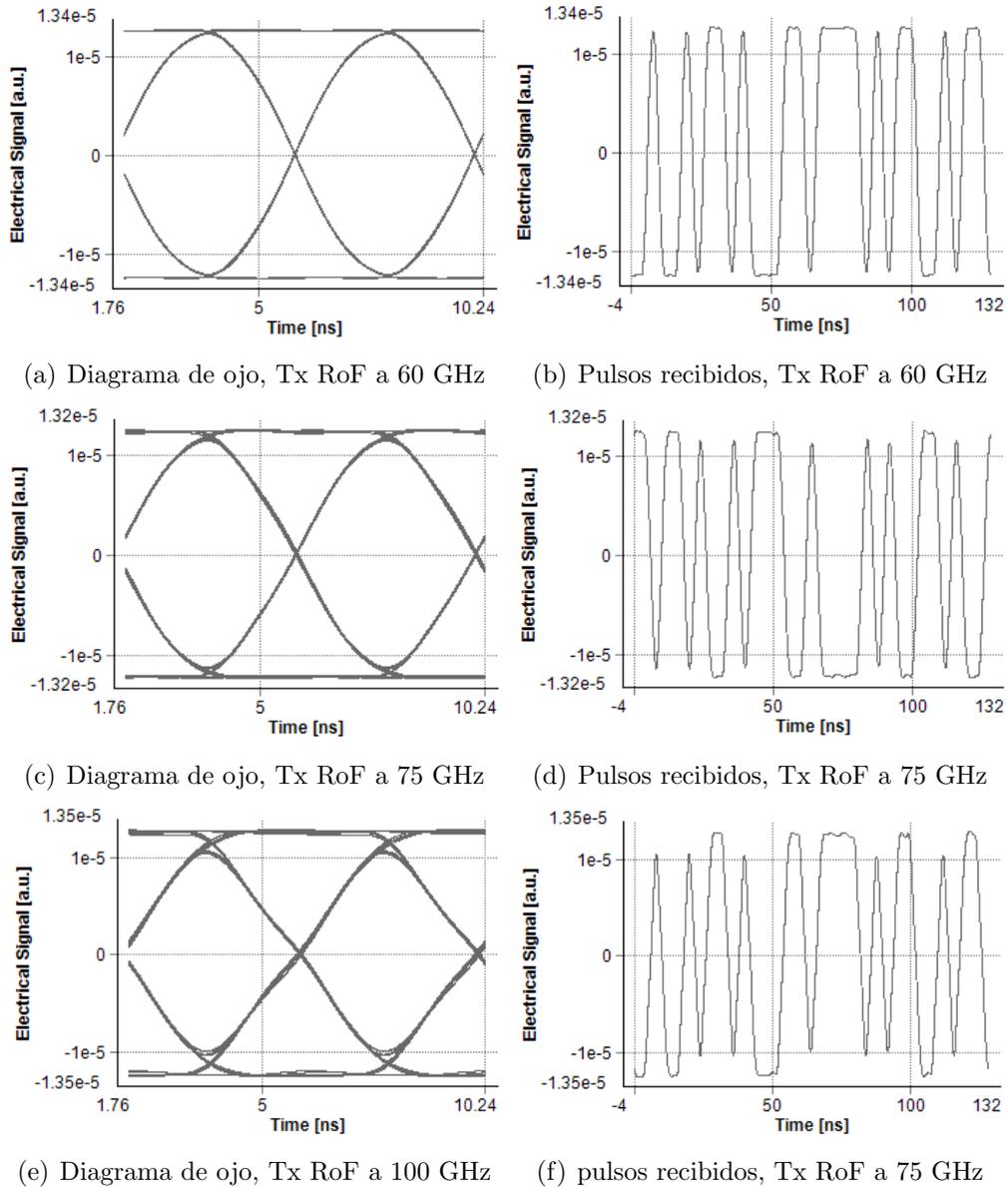
**Figura 3-29:** Transmisiones NRZ a 2.5 Gbps en BB y RoF a 80 km

En la figura **3-25** se muestran los diagramas de ojo para una transmisión NRZ en banda base y RoF para diferentes portadoras a 40 y 80 km, y se nota un ojo completamente abierto que indica una transmisión sin errores. Las Figuras **3-26** y **3-27** muestran una transmisión NRZ a 1 Gbps, a 40 km y 80 km respectivamente, mostrando el diagrama de ojo y la señal en el tiempo mostrando como el ojo empieza a distorsionarse un poco con un pequeño traslapamiento del pulso a 40 km sólo a 100 GHz, pero indicando aún una buena transmisión, y para 80 km el traslapamiento se muestra para las 3 portadoras. Para 2,5 Gbps en las figuras **3-28** y **3-29** se muestra una distorsión que genera una interferencia intersímbolo.



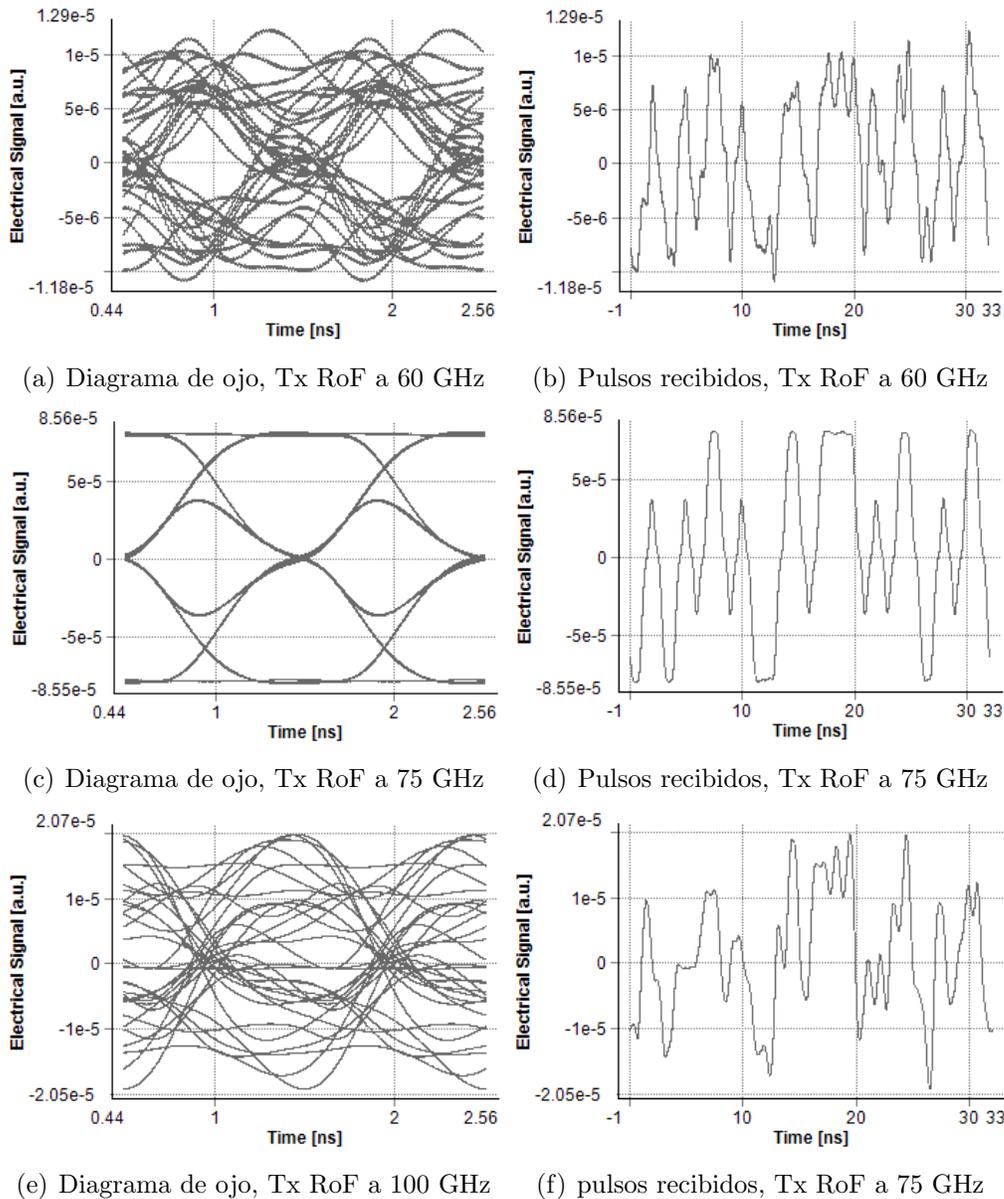
**Figura 3-30:** Transmisiones BPSK a 250 Mbps en RoF a 40 km

En las figuras 3-30 y 3-31 se exponen los diagramas de ojo y pulsos temporales de una transmisión BPSK a 250 Mbps a 40 y 80 km respectivamente. En estas figuras se evidencia una transmisión aceptable a 80 km, mostrando una pequeña interferencia intersímbolo a 100 GHz. A 40 km se muestra una buena transmisión con frecuencia portadora de 75 GHz, mientras que a 60 y 100 GHz, el ojo se distorsiona debido al traslapamiento de los pulsos y las variaciones de la potencia.

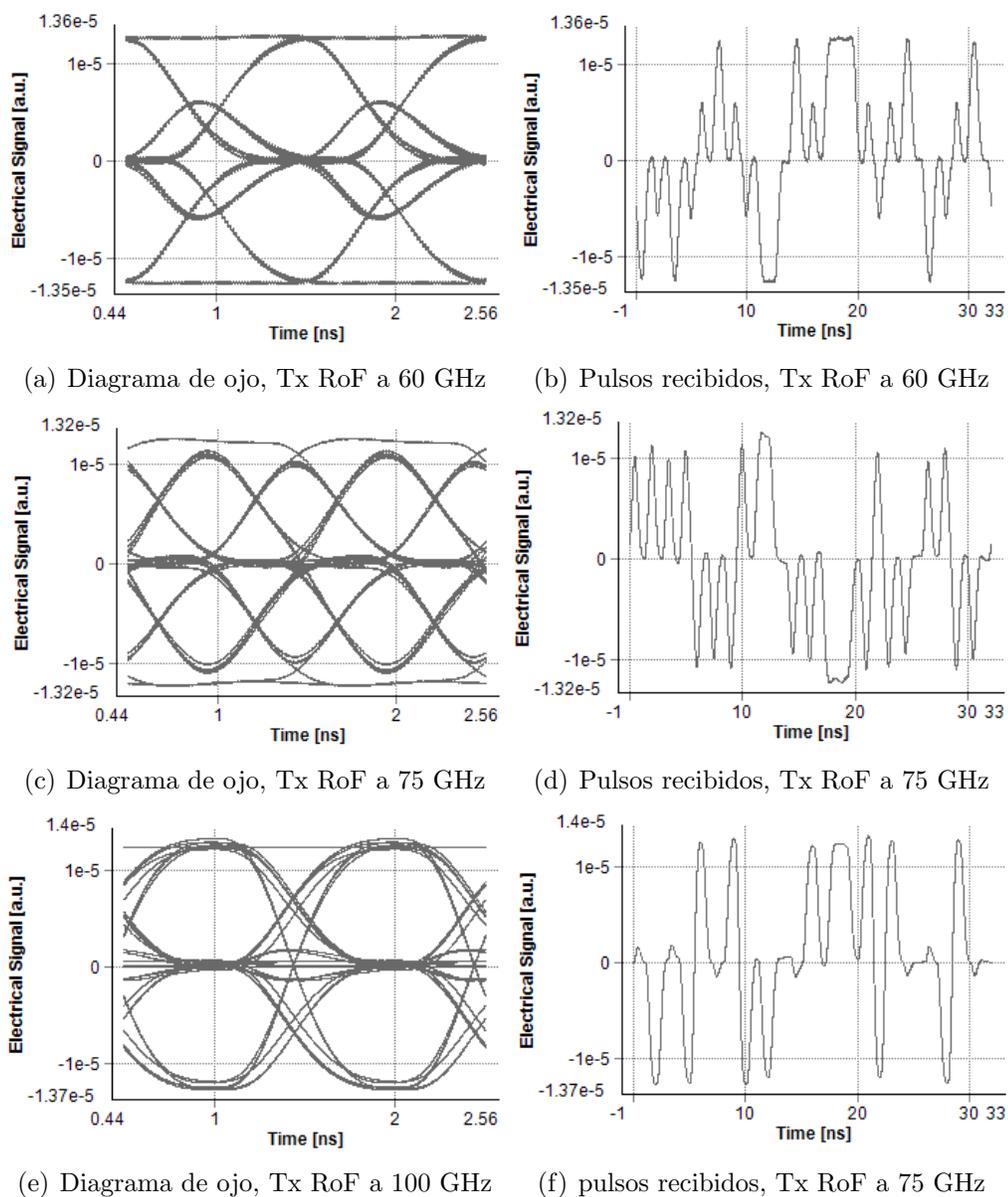


**Figura 3-31:** Transmisiones BPSK a 250 Mbps en RoF a 80 km

En las figuras 3-32 y 3-33 se exponen los diagramas de ojo y pulsos temporales de una transmisión BPSK a 1 Gbps a 40 y 80 km respectivamente. En estas figuras se evidencia que la señal se distorsiona completamente dado la interferencia intersímbolo, generando nuevos niveles indeseados de la señal, no haciendo posible la recuperación de los bits transmitidos.



**Figura 3-32:** Transmisiones BPSK a 1 Gbps en RoF a 40 km



**Figura 3-33:** Transmisiones BPSK a 1 Gbps en RoF a 80 km

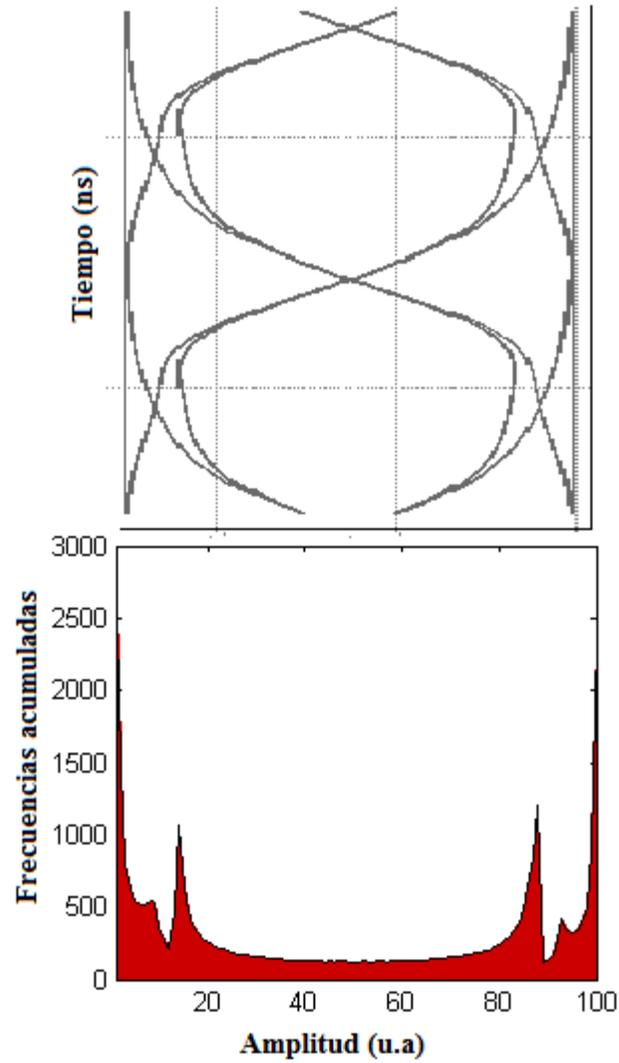
### 3.6. Monitoreo de la dispersión cromática usando histogramas asíncronos

En la sección anterior se hizo un análisis cualitativo del dominio temporal de transmisiones en NRZ y en BPSK en un sistema de radio sobre fibra, con velocidades de transmisión de 250 Mbps y 1 Gbps, con longitudes de fibra de 40 y 80 km, para estos casos se trabajó con portadoras de radiofrecuencia de 60, 75 y 100 GHz. En esta sección se plantea un novedoso método de monitoreo de la dispersión cromática y se prueba con las transmisiones antes mencionadas.

Para cada una de las transmisiones afectadas por la dispersión cromática se obtuvieron histogramas asíncronos de una muestra de la señal en el receptor en el dominio eléctrico. Los histogramas asíncronos se forman a partir de una proyección del diagrama de ojo sobre el eje  $x$ , previamente cambiando los ejes del diagrama de ojo como se muestra en la figura **3-34**, donde el eje  $x$  en el histograma representa la amplitud, y según la cantidad de puntos con igual amplitud que se repitan, el valor del eje  $y$  va aumentando. En la figura **3-34** se dividió la amplitud de la señal en 100 muestras, si la amplitud de la señal fuera de 1 mV, indicaría que cada valor de la muestra equivale a 0.01 mV, y cada valor que se repite se va acumulando, entonces, el eje del tiempo en el diagrama de ojo sería ahora en un histograma el eje de las frecuencias acumuladas, y entre mayor sea su valor, indicará que la señal tuvo más valores de amplitud en esa región, por lo que un histograma de una transmisión aceptable mostraría mayor frecuencias acumuladas para el valor de '1' y de '0'.

Se desea encontrar diferentes agrupamientos de puntos del histograma siguiendo una distribución gaussiana. Mediante el algoritmo de Máxima-Esperanza (EM, Expectation Maximization) se busca encontrar una estimación de máxima verosimilitud para diferentes mezclas de gaussianas en cada histograma mediante clusters [75], [76]. La dispersión cromática genera nuevos niveles indeseados en los pulsos recibidos, esto se puede evidenciar en los histogramas de las figuras **3-35**, **3-36** y **3-37**, por tal razón, se estima en cada histograma el número de picos o de nuevos niveles de la señal y a partir de esto se calcula igual cantidad de clusters teniendo como valor mínimo 3 clusters partiendo de una transmisión ideal donde se tenga la acumulación de los pulsos en '0' y '1' que se representan con picos a los extremos derecho e izquierdo del histograma y en el centro otro cluster con una dispersión de puntos con un valor bajo de frecuencias acumuladas.

En cada histograma se tiene un conjunto de puntos  $x$  con  $k$  distribuciones gaussianas distribuidas entre los puntos de  $x$ ,  $k$  se determina calculando el número de picos de la señal. Se desea encontrar el modelo de máxima verosimilitud para la ecuación:



**Figura 3-34:** Formación de un histograma a partir de un diagrama de ojo

$$\sum_{i=1}^k w_i g[m_i, V_i](x) \quad (3-2)$$

Donde  $w_i$  es un vector de pesos, por lo tanto se tienen  $k$  pesos, cada uno es un número real para los diferentes centros de  $k$ , y  $k$  matrices simétricas positivas, cada una de  $n \times n$ , donde cada una se establece con el fin de que el producto de las verosimilitudes de cada punto sea un máximo, esto es:

$$\prod_{x \in \mathcal{X}} \sum_{i=1}^k w_i g[m_i, V_i](x) \quad (3-3)$$

Donde cada gaussiana  $g[m_i, V_i]$  es de la forma:

$$g[m_i, V_i](x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n (\sqrt{\det(V_i)})} e^{-\frac{(x-m_i)^T V_i^{-1} (x-m_i)}{2}} \quad (3-4)$$

Y es maximizada mediante la elección adecuada de los pesos y parámetros para cada una de las distribuciones gaussianas.

Primero se inicializan las  $k$  gaussianas tales que  $V_i$  es la matriz identidad y los centros de  $k$  son valores pequeños aleatorios tomados en una distancia aleatorio de un dato de  $x$ .

Para cada punto de  $x \in \chi$  y cada  $i$  entre 1 y  $k$  se calcula la verosimilitud de los pesos  $w_i g[m_i, V_i](x)$ , usando los últimos parámetros calculados de  $w_i$ ,  $m_i$  y  $V_i$ . Para cada punto de  $x$ , sea  $\ell_i(x)$  la verosimilitud calculada en la  $i$ -ésima distribución gaussiana:

$$\ell_i(x) = w_i g[m_i, V_i](x) \quad (3-5)$$

Y sea  $S_x$  la suma

$$S_x = \sum_{i=1}^k w_i g[m_i, V_i](x) = \sum_{i=1}^k \ell_i(x) \quad (3-6)$$

y sea

$$P_i(x) = \frac{\ell_i(x)}{S_x} \quad (3-7)$$

En consecuencia se tiene que  $\sum_{x \in \chi} \sum_{i=1}^k P_i(x) = |\chi|$ , la cardinalidad de  $\chi$ .

Ahora se vuelven a estimar los pesos  $w_i$  así:

$$w'_i = \frac{\sum_{x \in \chi} P_i(x)}{|\chi|} \quad (3-8)$$

y los centros  $m'_i$  como los centroides ponderados

$$m'_i = \frac{\sum_{x \in \chi} P_i(x) x}{\sum_{x \in \chi} P_i(x)} \quad (3-9)$$

Y finalmente la  $i$ -ésima matriz de covarianza  $V'_i$  se vuelve a estimar así:

$$V'_i = \frac{1}{\left(\sum_{x \in \chi} P_i(x)\right)} \sum_{x \in \chi} P_i(x) [(x - m'_i)(x - m'_i)^T] \quad (3-10)$$

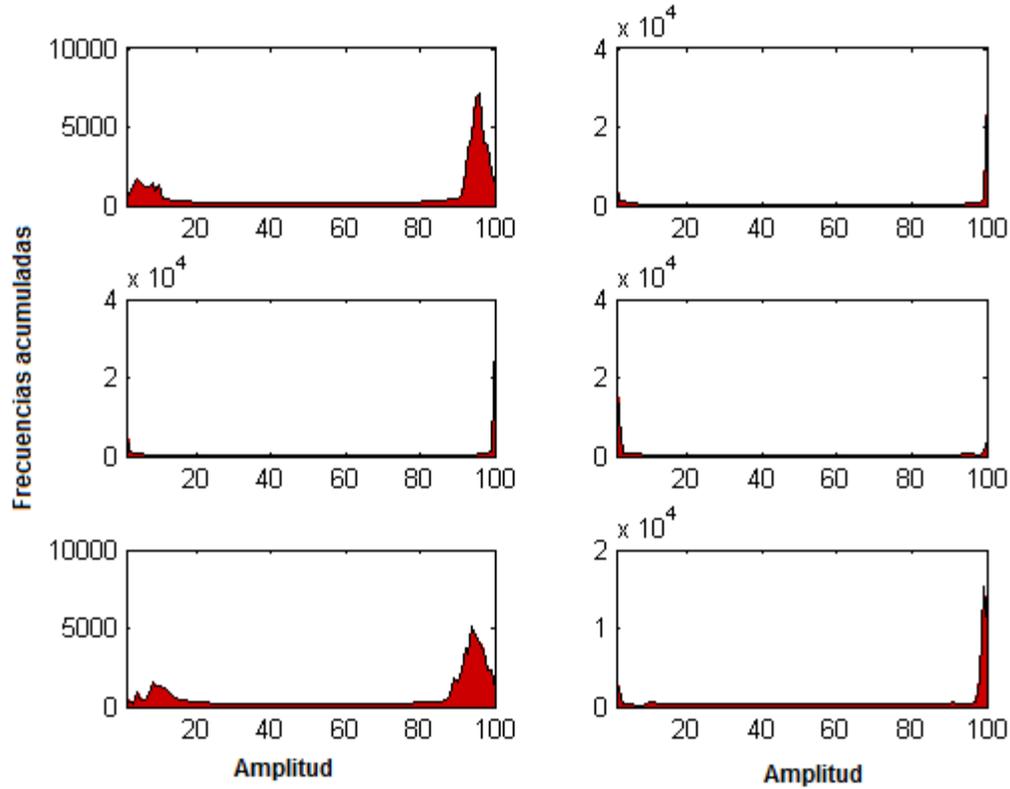
El proceso se repite con un número determinado de iteraciones y la solución puede converger o no dependiendo de los valores iniciales [77]. Teniendo la respuesta deseada en el algoritmo se espera tener la estimación de parámetros como la media, varianza, desviación estandar, entre otros, con los cuales se pueda dar una estimación de la dispersión cromática.

Métodos de estimación de parámetros ópticos usando histogramas asíncronos ([9], [10], [11], [12], [13]) estiman la dispersión por medio del cálculo de la media en los cúmulos de los valores de '1' y de '0' del histograma para señales banda base, pero estos valores basados en su posición en el eje  $x$  del histograma no determinan la cantidad de frecuencias acumuladas y estas frecuencias pueden determinar si hay mayor o menor distorsión de la señal, además no muestran la relación de nuevos picos que podrían aparecer en el histograma como en las transmisiones de señales de radio, por esta razón, este algoritmo planteado primero calcula el número de picos del histograma, y este es el número de distribuciones gaussianas que el algoritmo de EM va a calcular, además lo hace de manera bidimensional, tomándo los valores del eje  $x$  y del eje  $y$  estimando el agrupamiento de puntos (clusters) y el valor medio de estos grupos. Otro valor relevante en el cálculo del algoritmo, es la proporción de cada cluster respecto a la totalidad de puntos del histograma, esto con el fin de determinar una mayor o menor influencia para valores de la media calculadas determinando un factor de dispersión dado por la siguiente ecuación:

$$FD = \ln \left( \frac{\frac{\mu_1}{P_1} + \frac{\mu_n}{P_n}}{\sum_{i=2}^{n-1} \frac{\mu_i}{P_i}} \right) \mapsto n \geq 3 \quad (3-11)$$

Esta relación permite tener un valor del factor de dispersión menor cuando los clusters indeseados aumentan y además estos tienen una relación alta entre el valor de la media  $\mu$  y el valor porcentual del cluster  $P$ .

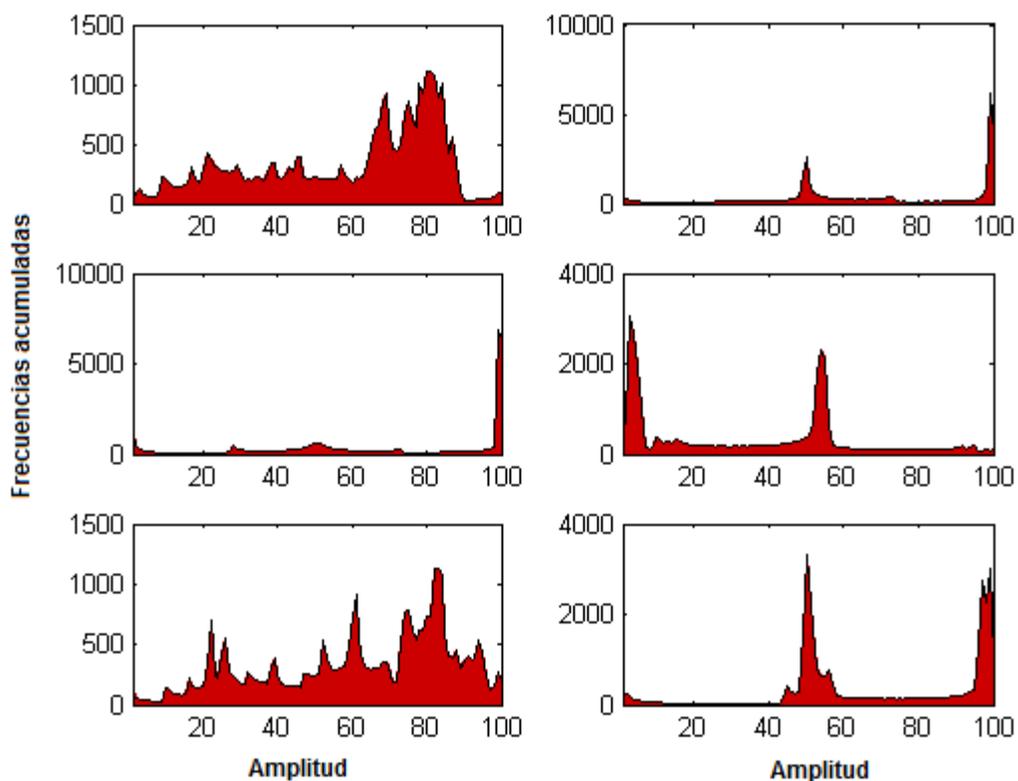
Para los histogramas de las figuras **3-35**, **3-36**, **3-37** y **3-38** se calcularon los factores de dispersión a partir de la ecuación 3-11 y estos se muestran en las tablas **3-5**, **3-6**, **3-7** y **3-8**.



**Figura 3-35:** Histograma de una transmisión BPSK a 250 Mbps (a) 60 GHz 40 km, (b) 60 GHz 80 km, (c) 75 GHz 40 km, (d) 75 GHz 80 km, (e) 100 GHz 40 km, (f) 100 GHz 80 km.

**Tabla 3-5:** Factor de dispersión en transmisión BPSK a 250 Mbps

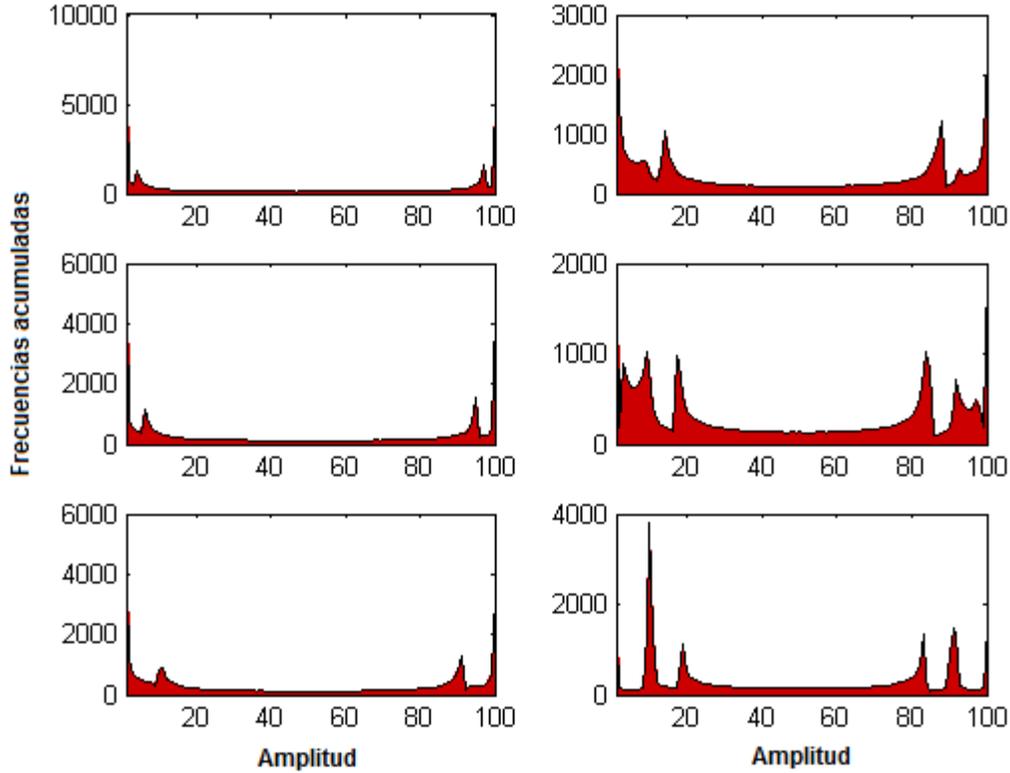
Frecuencia de Portadora	40 km	80 km
60 GHz	5.2688	7.0809
75 GHz	5.6004	6.3162
100 GHz	2.4144	3.7114



**Figura 3-36:** Histograma de una transmisión BPSK a 1 Gbps (a) 60 GHz 40 km, (b) 60 GHz 80 km, (c) 75 GHz 40 km, (d) 75 GHz 80 km, (e) 100 GHz 40 km, (f) 100 GHz 80 km.

**Tabla 3-6:** Factor de dispersión en transmisión BPSK a 1 Gbps

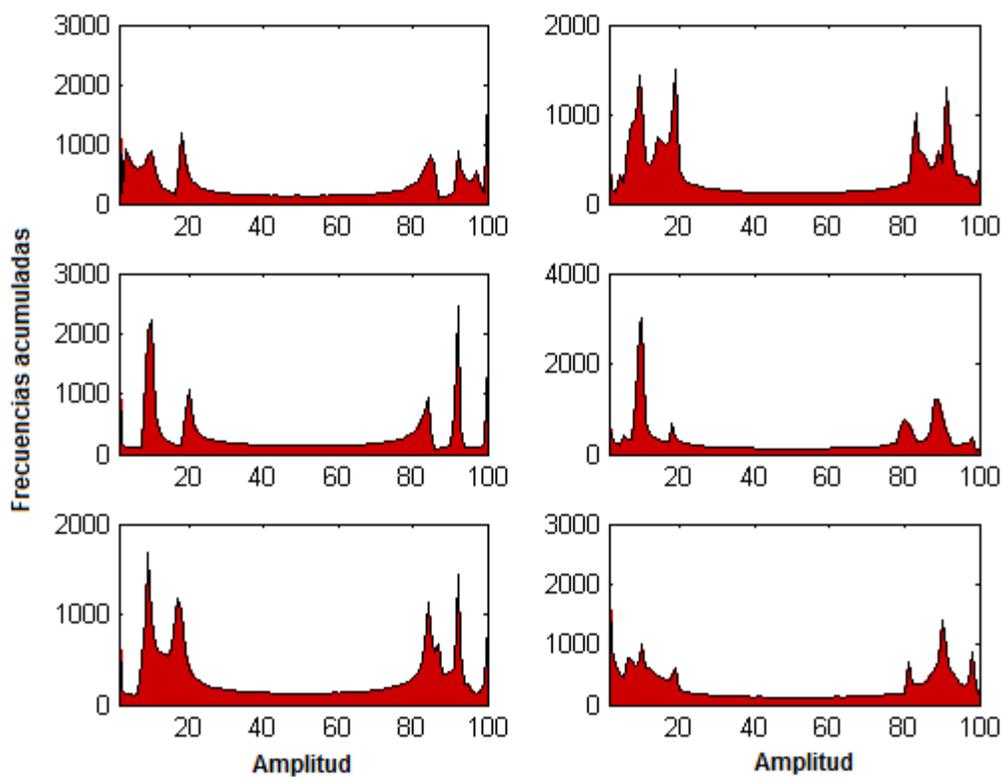
Frecuencia de Portadora	40 km	80 km
60 GHz	-4.3982	-3.6973
75 GHz	3.4134	-0.6974
100 GHz	-2.4628	0.9977



**Figura 3-37:** Histograma de una transmisión NRZ a 1 Gbps (a) 60 GHz 40 km, (b) 60 GHz 80 km, (c) 75 GHz 40 km, (d) 75 GHz 80 km, (e) 100 GHz 40 km, (f) 100 GHz 80 km.

**Tabla 3-7:** Factor de dispersión en transmisión NRZ a 1 Gbps

Frecuencia de Portadora	40 km	80 km
60 GHz	3.4207	2.1774
75 GHz	3.6397	2.5939
100 GHz	4.6486	-2.8842



**Figura 3-38:** Histograma de una transmisión NRZ a 2.5 Gbps (a) 60 GHz 40 km, (b) 60 GHz 80 km, (c) 75 GHz 40 km, (d) 75 GHz 80 km, (e) 100 GHz 40 km, (f) 100 GHz 80 km.

**Tabla 3-8:** Factor de dispersión en transmisión NRZ a 2.5 Gbps

Frecuencia de Portadora	40 km	80 km
60 GHz	1.2876	-0.4565
75 GHz	1.2746	-3.5166
100 GHz	-2.4214	-1.9435

La figura 3-39 muestra todos los valores del factor de dispersión de las tablas anteriores. Es notorio como el aumento de la frecuencia de la portadora no es proporcional a la disminución del factor de dispersión, y esto se puede notar en las gráficas de los histogramas, donde por ejemplo, en la figura 3-36(a) de una transmisión BPSK a 1 Gbps a 60 GHz se muestra un histograma con muchos picos en la señal y una concentración de frecuencias acumuladas en el centro de la gráfica, teniendo un factor de dispersión negativo de  $-4,389$ , mientras que en la gráfica 3-36(c) es la misma transmisión BPSK a 1 Gbps pero con una frecuencia portadora de 75 GHz y teniendo un factor de dispersión calculado de  $3,4134$ .

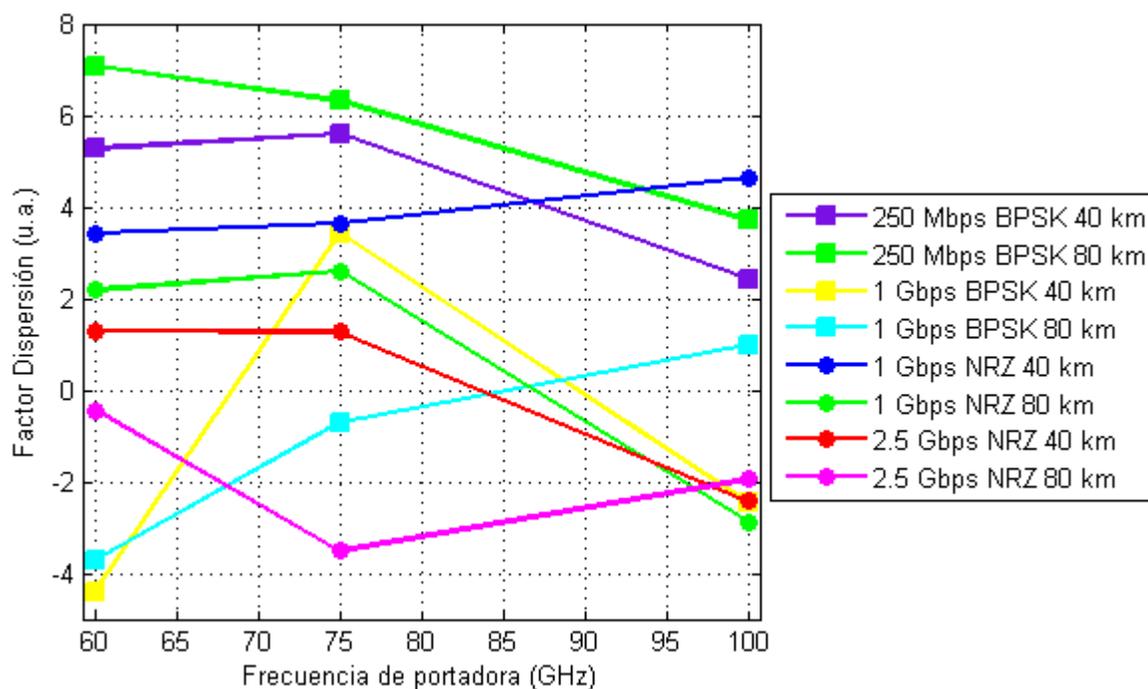


Figura 3-39: Factor de dispersión

# 4 Sistemas de Radio sobre Fibra modulados en fase óptica con detección coherente

## 4.1. Modulación en fase óptica y detección coherente

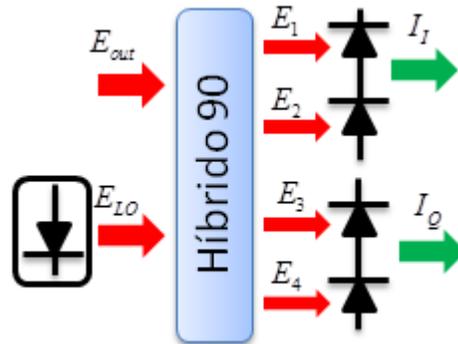
Los último sistemas de comunicaciones estudiados se basan en detección síncrona, los cuales usan un oscilador local para recuperar la información completa de la señal entrante, conocida como detección coherente, que en contraste con los sistemas de tecnología de detección directa, un esquema de detección coherente, no solo detectaría la amplitud de la señal sino también la fase y la polarización. Este tipo de sistemas se puede dividir en 2 familias diferentes, si usa una etapa de frecuencia intermedia se llama heterodino o sino se conoce como homodino.

- Homodina: La señal óptica que llega al receptor se suma a la señal del oscilador local antes de la foto detección.
- Heterodina: Si la frecuencia del oscilador local es ligeramente diferente de la señal entrante, entonces la corriente resultante en la salida del fotodetector es centrada en alguna frecuencia intermedia.

Los enlaces RoF que modulan la fase (PM, phase modulated) de la señal óptica exhiben ventajas con respecto a los sistemas IM/DD, además de permitir la implementación unas BSs más simples [14]. Con un sistema de detección coherente óptico se incrementa la capacidad y la eficiencia espectral, más datos pueden ser transmitidos dentro del mismo ancho de banda, porque la detección coherente permite que la fase de la señal óptica y la polarización sea detectada y por lo tanto medida y procesada, las imperfecciones en la transmisión podrían ser mitigadas electrónicamente cuando una señal óptica es convertida en el dominio electrónico [19].

Sin embargo los enlaces RoF-PM requieren un receptor óptico coherente combinados con módulos de DSP para la detección y la demodulación lineal de señales. La detección óptica coherente ha sido demostrada para llevar a cabo la demodulación lineal de señales de MMW, codificada sobre la fase de una portadora óptica [49]. La principales ventajas ofrecida por

los sistemas RoF-PM con detección coherente sobre los sistemas RoF IM/DD son: 1) mayor rango dinámico de estímulo libre (SFDR, larger spur-free dynamic range), 2) transmisión óptica de datos con mayor eficiencia espectral en formatos avanzados de modulación, 3) Mayor ancho de banda y selectividad del canal y 4) menores requerimientos en la potencia de la señal de transmisión. Los receptores coherentes basados en DSP reconstruyen la señal microondas transmitida a partir de la fase óptica de la portadora, para luego realizar la demodulación. En la figura 4-1 se muestra un esquema de un receptor digital coherente para sistemas RoF-PM.



**Figura 4-1:** Receptor digital coherente para sistemas RoF PM

Las principales ventajas de los receptores digitales coherentes comparado con los receptores tradicionales son: 1) costo efectivo y de tamaño reducido, 2) compensación adaptativa de las imperfecciones del canal en el dominio electrónico usando técnicas de procesamiento de señales, 3) versatilidad en el diseño y robustez en la operación, permitiendo diferentes formatos usando el mismo hardware en el receptor [49].

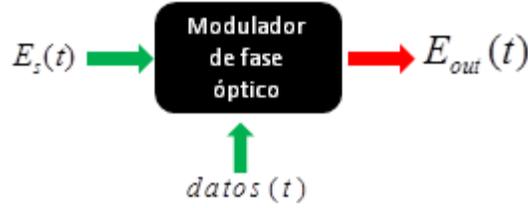
Para los sistemas RoF que codifican la información dentro de la portadora de RF la cual modula la fase de la portadora óptica, se necesitan 2 módulos de procesamiento digital de señales: el primer módulo es un DPLL (del inglés Digital phase-locked-loop) que remueve el offset entre la fase de la señal óptica entrante y la del oscilador local, el segundo módulo se necesita para remover el offset de la fase de la señal RF antes de demodular la señal [49].

#### 4.1.1. Modulador de fase óptica

Se tiene la señal  $E_s(t)$  como se muestra en la ecuación 4-1

$$E_s = \sqrt{P_s} e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \quad (4-1)$$

Donde  $P_s$  es la intensidad de la señal y  $(\omega_s t + \varphi_s)$  corresponde a la frecuencia y fase de la señal. Esta señal ingresa al modulador óptico como la señal portadora a una frecuencia en el rango de ondas milimétricas, en este caso se trabaja con 60, 75 y 100 GHz.



**Figura 4-2:** Modulador de fase óptica

El sistema RoF modula la fase óptica de la señal, el modulador de la figura 4-2 se puede representar matemáticamente por la ecuación 4-2:

$$E_{out}(t) = E_s(t) * e^{j\Delta\varphi * datos(t)} \quad (4-2)$$

Donde  $\Delta\varphi$  es el índice de modulación dado por la ecuación

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{V_{pi}} \quad (4-3)$$

Y  $datos(t)$  es la información que ingresa al modulador óptico con formatos BPSK y QPSK. Obteniendo la ecuación 4-4 para la salida del modulador de fase óptico.

$$E_{out}(t) = \sqrt{P_{out}} e^{j(\omega_{out}t + \varphi_{out} + \frac{\pi}{V_{pi}} datos(t))} \quad (4-4)$$

### 4.1.2. Receptor Coherente

Para la detección coherente se usa un laser llamado oscilador local conectado a un híbrido 90, este dispositivo divide la señal en 4 señales en su salida que son iguales a la recibida pero con un desfase de 90 grados entre ellas como se muestra en la matriz de la ecuación 4-5, dónde  $E_{outdisp}$  es la señal saliente del canal de fibra óptica.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & j \\ 1 & -1 \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{outdisp} \\ E_{LO} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$E_{LO}$  es la señal proveniente del oscilador local y se representa con la siguiente ecuación:

$$E_{LO} = \sqrt{P_{LO}} e^{j(\omega_{LO}t + \varphi_{LO})} \quad (4-6)$$

Resolviendo la matriz de la ecuación 4-5 obtenemos los resultados de las ecuaciones 4-7, 4-8, 4-9 y 4-10.

$$E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{out} + E_{LO}) \quad (4-7)$$

$$E_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} (j * E_{outdisp} - j * E_{LO}) \quad (4-8)$$

$$E_3(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{outdisp} + j * E_{LO}) \quad (4-9)$$

$$E_4(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{outdisp} - j * E_{LO}) \quad (4-10)$$

Las anteriores señales pasan a través de los 4 fotorreceptores que se muestran en la fig. 3 para la conversión opto-eléctrica como en las ecuaciones 4-11, 4-12, 4-13 y 4-14 , donde  $R$  es el factor de responsividad de este dispositivo.

$$I_1 = R * |E_1(t)|^2 \quad (4-11)$$

$$I_2 = R * |E_2(t)|^2 \quad (4-12)$$

$$I_3 = R * |E_3(t)|^2 \quad (4-13)$$

$$I_4 = R * |E_4(t)|^2 \quad (4-14)$$

## 4.2. Análisis espectral

Se simuló el sistema RoF de la figura 4-3 para transmisión de tonos simples con frecuencias portadoras de 60, 75 y 100 GHz en VPI, con una laser de onda continua de ancho espectral 10 MHz y longitud de onda de 1550 nm, obteniendo los espectros eléctricos a la salida de los fotodetectores PIN con factor de responsividad de 0.9, haciendo una comparación entre las distancias de 40 y 80 km.

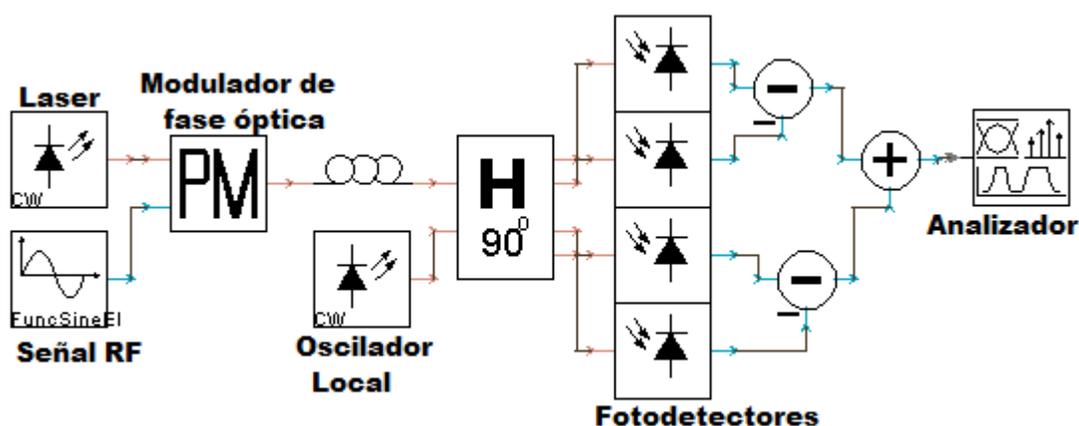


Figura 4-3: Sistema de transmisión IM/DD de tonos simples

En la figura 4-4 se muestran los espectros RF en el dominio eléctrico a la salida de los fotodetectores. Los espectros con CD muestran una atenuación comparado con el espectro sin CD pero debido a la atenuación propia de la fibra óptica (0.2 dB/km), además, se nota una diferencia en la frecuencia central debido a la detección heterodina donde se usó un oscilador local con una diferencia de frecuencia de 250 MHz. También se puede observar que en el segundo armónico no es tan notoria la distorsión como lo fue en los espectros eléctricos de los sistemas IM/DD, que como se explicó en el capítulo anterior, la CD afecta este armónico luego de que la señal sea fotodetectada.

Se implementó en Matlab un sistema PM con detección coherente a partir de los modelos matemáticos de la sección anterior. En este sistema se transmite una señal modulada electricamente en BPSK y en QPSK a través del modulador óptico de fase y se obtienen los espectros en el receptor después de los fotodetectores y también después del DPLL. En la figura 4-5 se muestran los espectros para una transmisión QPSK comparando la transmisión con CD y sin CD, además del efecto que produce el DPLL en el espectro, donde la señal aumenta su potencia y corrige el desfase de la señal. Los espectros para QPSK y BPSK muestran un comportamiento similar en su potencia y en su degradación como se muestra en la figura 4-6 donde se comparan los espectros RF de un caso particular de una transmisión.

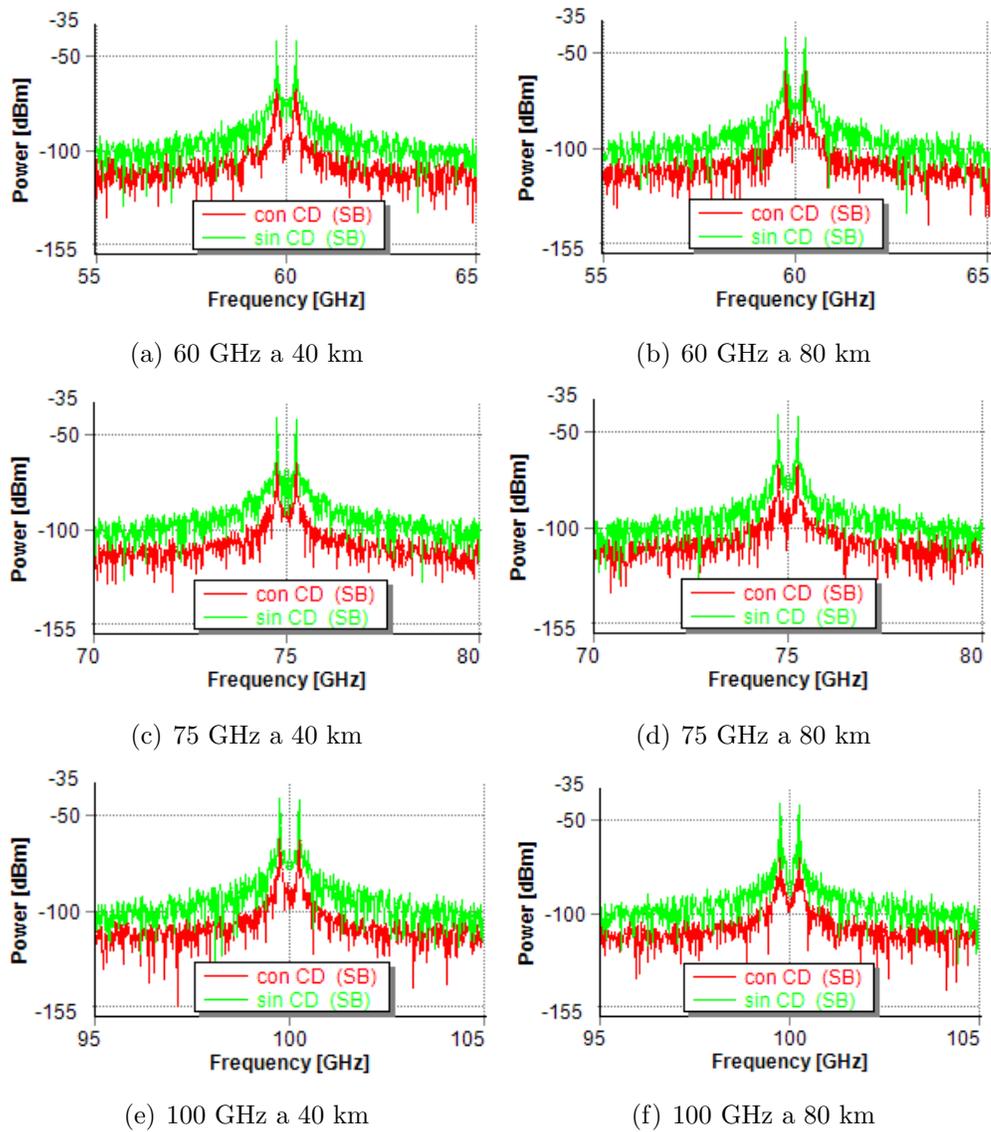
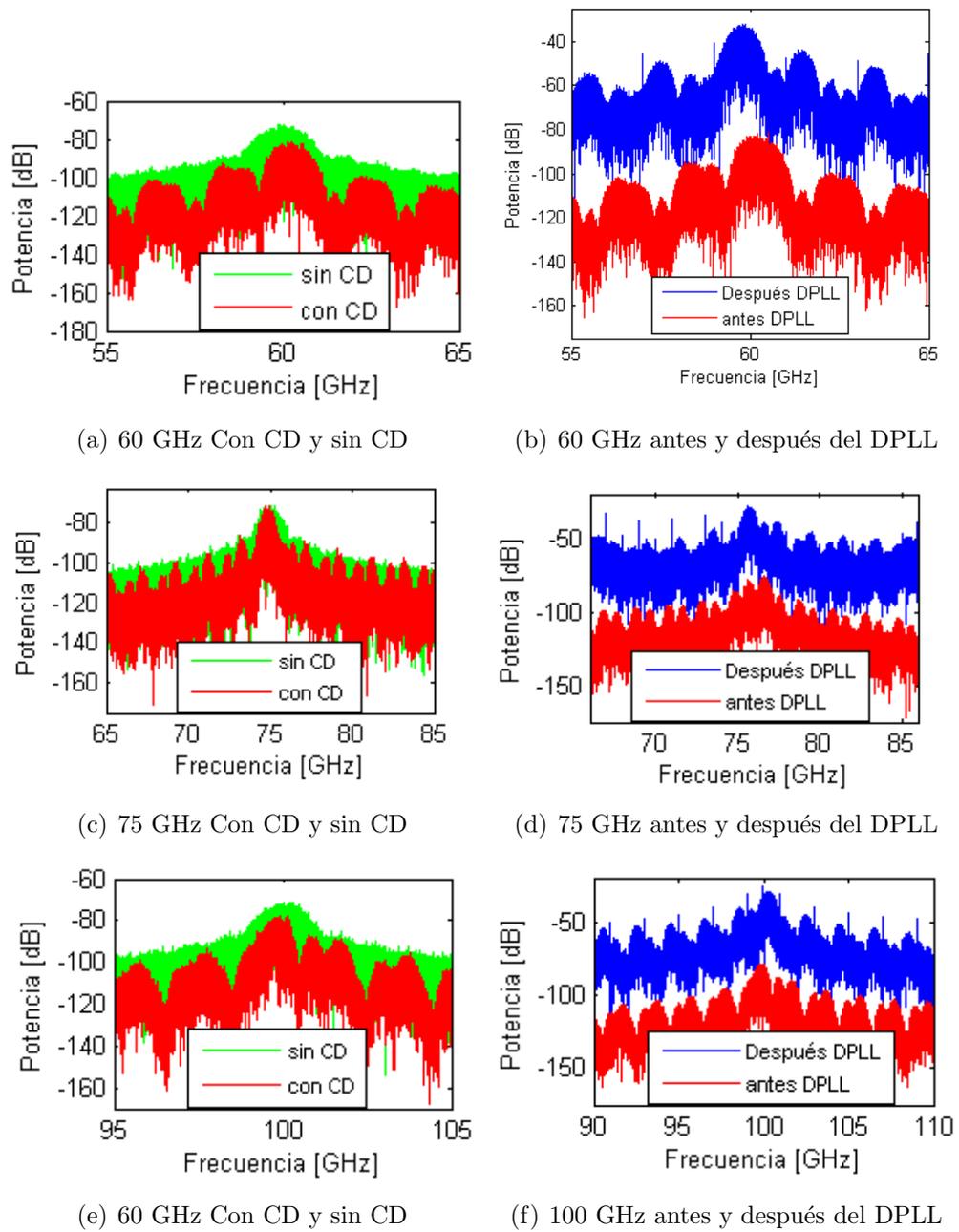


Figura 4-4: Espectros RF tonos simples PM/CD



**Figura 4-5:** Espectros RF transmisión a 1 Gbps

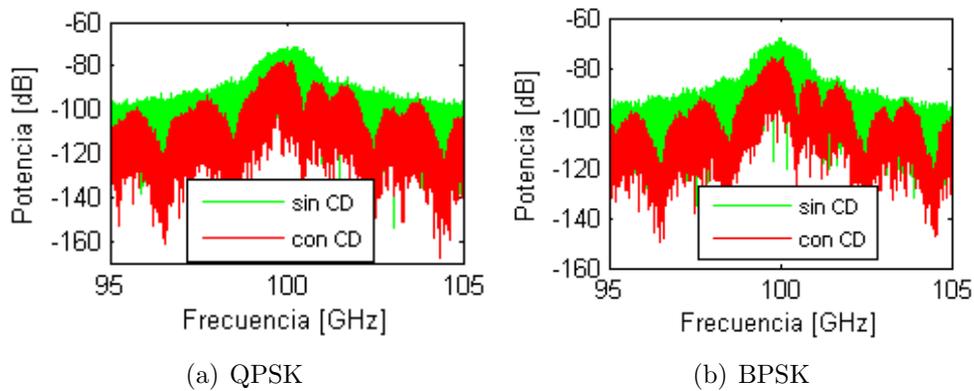


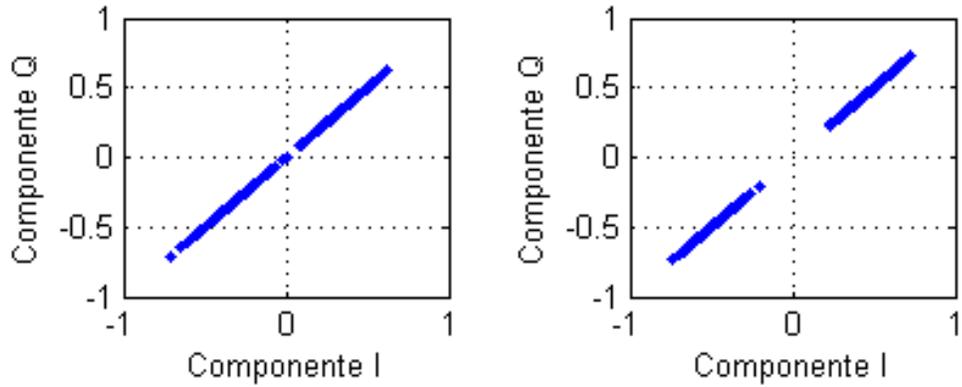
Figura 4-6: Espectros RF transmisión a 1 Gbps en 80 km a 100 GHz

### 4.3. Diagramas de constelación y curvas BER vs. SNR transmisión en PSK

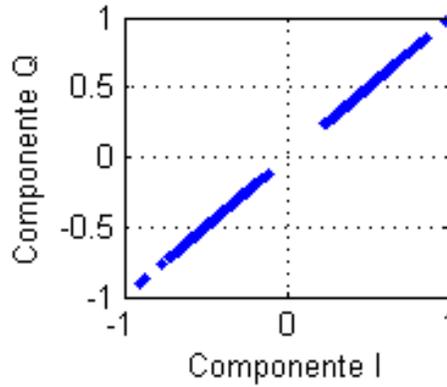
Para una transmisión BPSK a 250 Mbps menores a los 80 km se muestran transmisiones aceptables para las frecuencias de 60, 75 y 100 GHz, mostrando cero errores en la transmisión con SNR superiores a los 3 dB, siendo un valor con mucho ruido, donde la detección coherente permite la recuperación de la información. En la fig. 4-7(a) se muestra un diagrama de constelación para una transmisión a 60 GHz en 80 km con OSNR de 4 dB, la constelación está distorsionada pero aun es recuperable la información.

Para la transmisión BPSK a 1 Gbps se muestran los diagramas de constelación de las figuras 4-9(b) y 4-9(b) para 60 y 100 GHz respectivamente, donde se muestra más distorsión para los 100 GHz para una OSNR de 18 dB. No obstante, las curvas BER vs. OSNR muestran un comportamiento similar donde se evidencia una mayor tasa de error de bit para los 60 GHz que para los 75 y 100 GHz, aunque la diferencia es mínima se debe considerar ya que el receptor coherente puede converger de diferentes maneras según el punto inicial de la señal, el cual fue variado aleatoriamente hasta obtener mejores resultados como los que se exponen en la figura 4-8.

Se obtuvieron los diagramas de constelación QPSK para portadoras de 60, 75 y 100 GHz a 250 Mbps y 1 Gbps, con una OSNR de 18 dB para observar la influencia de la CD según la portadora de RF transmitida. En la figura 4-9(a) se muestra el diagrama de constelación para una transmisión a 60 GHz a 250 Mbps y en la figura 4-9(b) a 1 Gbps, comparando estas 2 gráficas se evidencia una mayor distorsión en los puntos de la figura 4-9(b), para ambas transmisiones con la misma relación señal a ruido, se evidencia un incremento en la distorsión debido a la CD. En las figuras 4-9(c) y 4-9(d) se muestran unas constelaciones más distorsionadas para el caso de los 75 GHz a 250 Mbps que a 1 Gbps, mostrando un

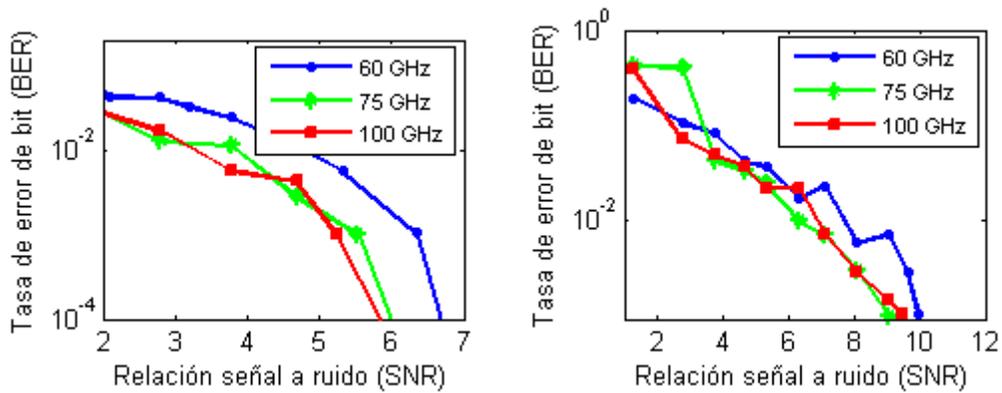


(a) 60 GHz a 1 Gbps con SNR de 18 dB (b) 60 GHz a 250 Mbps con SNR de 4 dB



(c) 100 GHz a 1 Gbps con SNR de 18 dB

**Figura 4-7:** Diagramas de Constelación BPSK a 80 km

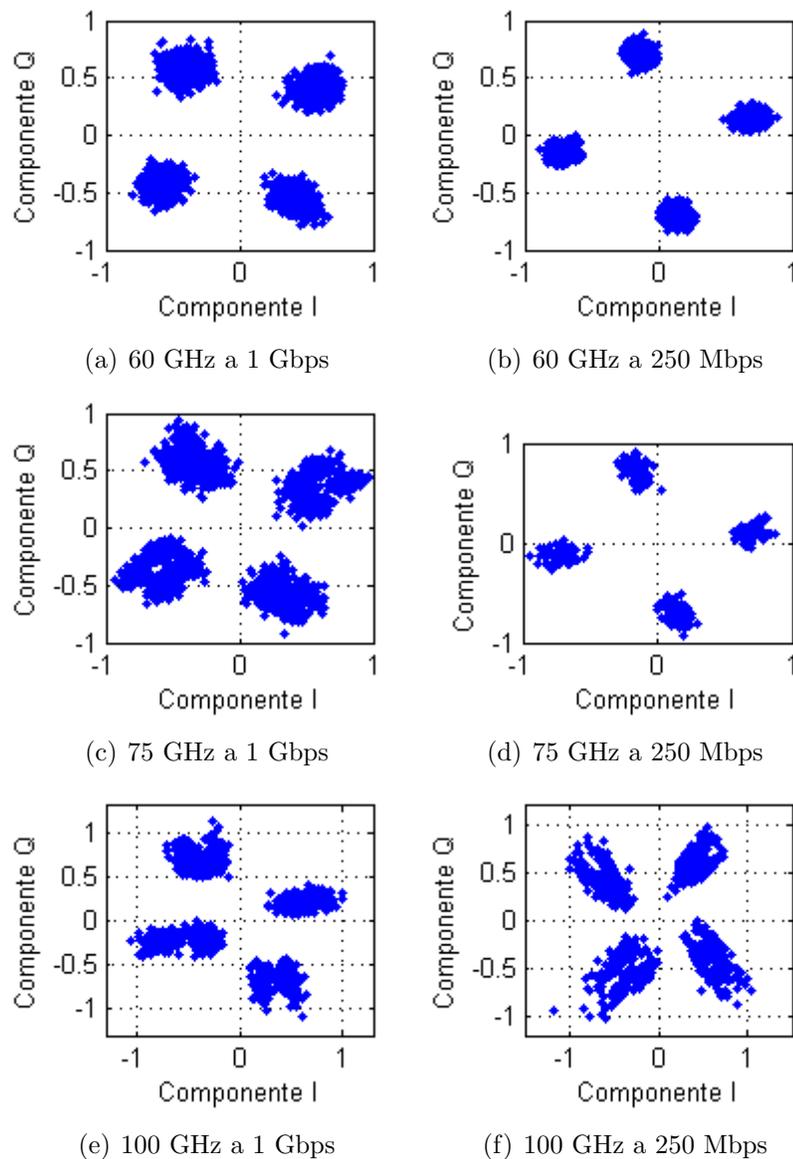


(a) BPSK sobre 40 km

(b) BPSK sobre 80 km

**Figura 4-8:** Curvas BER vs. SNR a 1 Gbps

desfase en la constelación similar al caso de los 60 GHz. Para 100 GHz en las figuras 4-9(e) y 4-9(f) se muestra un mayor incremento en la distorsión de la constelación.

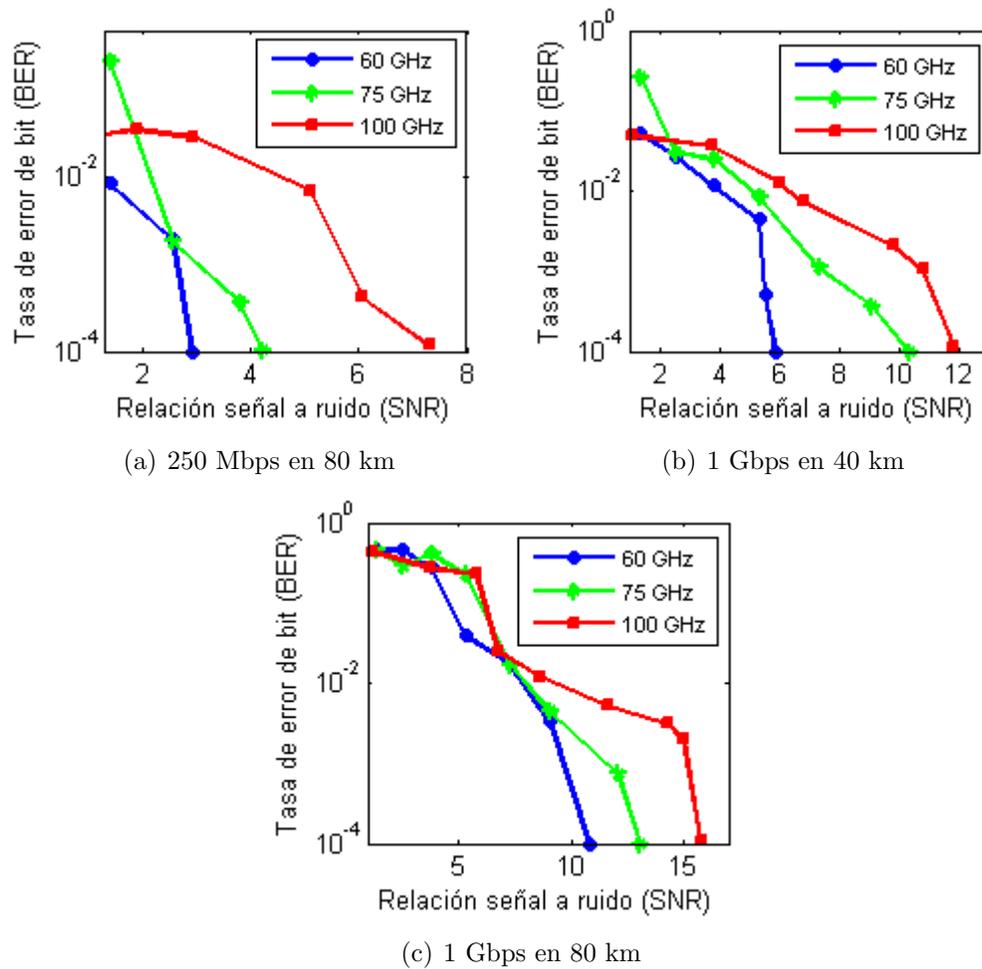


**Figura 4-9:** Diagramas de Constelación QPSK a 80 km con SNR de 18 dB

Para la transmisión QPSK se obtuvieron las curvas BER vs. SNR de las figuras 4-10(a), 4-10(b) y 4-10(c). En la fig. 20 se transmitió a 250 Mbps con valores aceptables de tasa de errores, mostrando tolerancia al ruido sobre todo en las portadoras a 60 y 75 GHz, para los 100 GHz empieza a ser considerable a diferencia de la transmisión BPSK dónde se mostró una mayor tolerancia al ruido con valores cercanos a los 3 dB.

En las figuras 4-10(b) y 4-10(c) se muestran las curvas para una transmisión a 1 Gbps a 40 y 80 km respectivamente. Es evidente la influencia de la distancia de transmisión en la tasa

de error de bit mostrando la relación de la CD con la longitud de la fibra.



**Figura 4-10:** Curvas BER vs. SNR transmisión en QPSK

## 5 Conclusiones

En esta tesis se estudian los efectos de la dispersión cromática en un sistema de Radio sobre Fibra que transmite con frecuencias de portadora superiores a los 60 GHz, se analizan los espectros ópticos de transmisiones de tonos simples y estos no presentan efectos notorios debidos a la dispersión cromática, no obstante, la dispersión cromática puede generar desfases de 180 grados en el dominio temporal óptico que dependen de la distancia y la frecuencia de la portadora, además se muestra como en casos como de una transmisión de un tono simple a 60 GHz en 40 km de fibra, la onda en una trama del tiempo presenta una distorsión de la onda y un valor menor pico a pico aún cuando se transmite sobre una fibra sin atenuación. Se obtuvieron medidas de la tasa de error de bit para transmisiones moduladas en amplitud y en fase (BPSK), mostrando menor error la primera modulación, logrando tasas de error de bit de  $1e-4$  para 80 km a 100 GHz a 1 Gbps con una relación señal a ruido óptica de 24 dB, mientras que para la transmisión en fase la misma tasa se logra con una relación señal a ruido óptica de 70 dB pero a 250 Mbps. Además, se concluye que el BER no es mayor respecto aumenta la frecuencia de la portadora en BPSK como en el caso NRZ, a 80 km presenta mayor BER a 75 GHz y menor BER a 60 GHz, mientras que para el caso de 40 km el mayor BER se presenta a 60 GHz y menor BER a 75 GHz, en 10 km también se tiene mayor BER a 60 GHz y menor BER a 100 GHz.

Para BPSK a 1 Gbps no se puede transmitir información recuperable con portadoras de 60, 75 y 100 GHz, analizando el dominio temporal se muestra como se genera una interferencia intersímbolo y aparecen nuevos niveles en la señal, mostrando en el diagrama de ojo.

Para un sistema RoF a 60 y 100 GHz con velocidades transmisión de 155 Mbps, 1 y 2,5 Gbps en 2km de longitud de fibra, la señal no se ve afectada por la dispersión cromática, mostrando valores de EVM menores a 1,1% . Para una distancia de 50 km solo se tiene una señal aceptable para una velocidad de 155 Mbps con valores de EVM del 0,84% y 3,69% para portadoras de 60 y 100 GHz respectivamente. Para 100 km solo tiene un valor aceptable de EVM del 5% para 155 Mbps pero solo a 60 GHz.

Se propuso un método de la dispersión cromática usando histogramas asíncronos partiendo de la señal en el dominio temporal debido a que los espectros ópticos no se afectaron por la dispersión. El algoritmo de EM estimó las distribuciones gaussianas en los histogramas, cuando el número de clusters era superior a 7, el algoritmo necesitaba de más de 270 iteraciones para llegar a un punto de convergencia. Con el algoritmo de EM se estimó la

---

media estadística y la cardinalidad de cada cluster, y a partir de estos valores se propuso una ecuación para determinar el factor de dispersión de cada transmisión, mostrando una relación proporcional al análisis cualitativo de la señal en el histograma y en el dominio temporal, obteniendo valores del factor de dispersión entre  $-4,3982$  y  $7,0809$ , primer valor correspondiente a una transmisión BPSK a 1 Gbps a 60 GHz en 40 km, mostrando el peor desempeño de las transmisiones simuladas, y el segundo valor corresponde a la transmisión con mejor desempeño en BPSK a 250 Mbps en 50 km.

Los resultados obtenidos con el método propuesto de monitoreo usando ajustamiento gaussiano en histogramas asíncronos, presenta factores de dispersión que están directamente relacionados con los resultados de las curvas y del cálculo del EVM en el diagrama de constelación, además por medio de un análisis cualitativo, se puede observar en los diagramas de ojo y en el histogramas una mayor o menor afectación de la señal por parte de la dispersión cromática, lo que permite una corroboración del nuevo método propuesto de monitoreo de la dispersión. Se esperaba que en los resultados el aumento de la frecuencia de la portadora afectara más la señal, pero la dispersión cromática al tener un comportamiento cíclico, su efecto es mayor en ciertos "nodos" dependiendo de varios parámetros, por lo que se puede ver en ciertos casos, una transmisión a 80 km mejor que a 40 km con los demás parámetros iguales, o ver que la CD afecta menos la señal a 100 GHz que a 60 GHz en ciertas distancias y bajo ciertos parámetros. Lo que se buscó en esta tesis es evaluar el efecto de esta dispersión en transmisiones de radiofrecuencia en la banda de las ondas milimétricas a largas distancias y observar su impacto, y variaciones en parámetros y por los resultados obtenidos se determina que las frecuencias de portadora no influyen proporcionalmente en los efectos de la dispersión así como la longitud de la fibra. Además, se pudo tener un logro adicional al poder proponer una ecuación que estimara un factor de dispersión para este tipo de sistemas estudiados donde pequeñas variaciones en un sólo parámetro de la red puede afectar de manera significativa a la señal recibida, por lo tanto en un escenario de una red inteligente futura, este método de estimación podría usarse para determinar la viabilidad en la implementación de redes ópticas, logrando una compensación de las imperfecciones de la fibra óptica.

En la tesis, además, se expuso un esquema adicional de sistemas de Radio sobre Fibra, con modulación de fase óptica y detección coherente, en el cual se realizan simulaciones experimentales mediante modelos matemáticos del sistema afectado por la dispersión cromática con transmisiones BPSK y QPSK, mostrando una mejor transmisión que en los un sistema con detección directa. El sistema RoF modulado en fase óptica con detección coherente mostró transmisiones aceptables para modulaciones en BPSK y QPSK. Para la transmisión en QPSK se lograron tasas de error de bit de con niveles de SNR inferiores a los 16 dB, valor máximo obtenido transmitiendo a 1 Gbps con frecuencia RF de 100 GHz, en 80 km de longitud de fibra, y un valor SNR de 12 dB para iguales parámetros pero con una longitud

de 40 km. Se logró el nivel mínimo de SNR de 3 dB para velocidades de transmisión de 250 Mbps a 80 km con frecuencia portadora de 60 GHz. Esto evidencia la estrecha relación que tienen los efectos de la dispersión cromática con la distancia, la velocidad de transmisión y la frecuencia portadora. No obstante, para la transmisión BPSK a 1 Gbps se obtuvieron resultados similares para las portadoras de 60, 75 y 100 GHz obteniendo mejor resultado para la frecuencia RF de 100 GHz pero con diferencia de menos de 1 dB entre las otras frecuencias. Además, a 250 Mbps en BPSK se pudo transmitir sin errores en el receptor para 40 y 80 km con una SNR cercana a cero, lo que muestra una gran tolerancia a la dispersión cromática en estos sistemas de detección óptica coherente.

# Bibliografía

- [1] G. Smith, D. Novak and C. Lim, "A millimeter-wave full-duplex WDM/SCM fiber-radio access network", Optical Fiber Communication Conf., San José, CA, 1998. pp.18-19, 22-27.
- [2] Calvin C. K. Chan, "Optical Performance Monitoring: advanced techniques for next generation photonic networks", ISBN 978-012-374950-5, ELSEVIER 2010.
- [3] T. Luo, Z. Pan, S. M. R. Motaghian Nezam, L. S. Yan, A. Sahin, and A.E. Willner, "Chromatic-dispersion-insensitive PMD monitoring using optical off-center bandpass filtering," presented at the Conference on Optical Fiber Communications (OFC) '03, Mar. 2003, paper ThY3.
- [4] Bosco G. et al "Joint DGD, PDL and Chromatic Dispersion Estimation in Ultra-Long-Haul WDM Transmission Experiments with Coherent Receivers", ECOC 2010, Torino, Italy. Th.10.A.1
- [5] S. Faruk, Y. Mori, C. Zhang, K. Kikuchi "Multi-Impairments Monitoring from the Equalizer in a Digital Coherent Optical Receiver", ECOC 2010, Torino, Italy. Th.10.A.2
- [6] H. Sun, K.Wu, and K. Roberts, "Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system", Opt. Express, vol. 16, no. 2, pp. 873-879, Jan. 2008.
- [7] F. N. Hauske, J. C. Geyer, M. Kuschnerov, K. Piyawanno, T. Duthel, C. R. S. Fludger, D. van den Borne, E.-D. Schmidt, B. Spinnler, H. de Waardt, and B. Lankl, "Optical performance monitoring from FIR filter coefficients in coherent receivers," Conf. on Optical Fiber Communications (OFC), Feb. 2008, paper OThW2.
- [8] Xiaoxia Wu, Jeffrey A. Jargon, Ronald A. Skoog, Loukas Paraschis, and Alan E. Willner, "Applications of Artificial Neural Networks in Optical Performance Monitoring", Journal of Lighthwave Tech., Vol. 27, No. 16, pp 3580-3589 Aug. 15, 2009.
- [9] Hui Chen; Poon, A.W.; Xi-Ren Cao; , "Amplitude histogram-based method for in-fine pulse rise time monitoring without eye-diagram," Lasers and Electro-Optics, 2003. CLEO '03. Conference on pp.1511-1513, 6-6 June 2003

- 
- [10] Zhihong Li; Yixin Wang; Chao Lu; , "In-line signal quality monitoring based on asynchronous amplitude histogram for NRZ-DPSK systems, .optical Fiber Communication Conference, 2005. Technical Digest. OFC/NFOEC , Vol. 4, pp. 6-11, March 2005
- [11] Takara, H.; Shake, I.; Ohara, T.; Kozicki, B.; , "Optical performance monitoring using asynchronous amplitude histogram,.optical Internet, 2007 and the 2007 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology. COIN-ACOFT 2007. Joint International Conference on, pp.1-3, 24-27 June 2007.
- [12] Zhang Minglun; Zhang Yangan; Yuan Xueguang; Zhang Jinnan; Zhang Xiaoguang; , "Analyses of amplitude histogram methods used for optical performance monitoring, Information, Communications and Signal Processing, 2009. ICICS 2009. 7th International Conference on , vol., no., pp.1-3, 8-10 Dec. 2009.
- [13] Kozicki, B.; Takuya, O.; Hidehiko, T.; , "Optical Performance Monitoring of Phase-Modulated Signals Using Asynchronous Amplitude Histogram Analysis,"Lightwave Technology, Journal of , vol.26, no.10, pp.1353-1361, May15, 2008.
- [14] A. Ng'oma and M. Sauer, "Radio-over-fiber technologies for high data rate wireless applications,"Sarnoff Symp., Princenton, NJ, 2009. pp.1-6.
- [15] P. Chul, Y. Yong-Kee, L. C. Ong, "Full-duplex 60 GHz radio-over-fiber system for gigabit network application,"LEOS Annu. Meeting Conf. Proc., Belek-Antalya, 2009, pp.446-447.
- [16] R. Avo, P. Laurencio, M. Medeiros, "Simulation of mm-wave over fiber employing optical single sideband modulation combined with subcarrier multiplexing,"Mediterranean Winter, Marrakesh, 2008, pp.1-5, 11-13.
- [17] M. Mohamed, Z. Xiupu, B. Hraimel, W. Ke, "Efficient Photonic Generation of Millimeter-Waves Using Optical Frequency Multiplication in Radio-over-fiber Systems,"IEEE Microwave Photonics, 2007, pp.179-182, 3-5 Oct. 2007.
- [18] Y. L. Guennec, A. Pizzinat, S. Meyer, B. Charbonnier, P. Lombard, M. Lourdiane, B. Cabon, C. Algani, A. Billabert,, M. Terre, C. Rumelhard, J. L. Polleux, H. Jacquinet, S. Bories, C. Sillans, "Low-Cost Transparent Radio-Over-Fiber System for In-Building Distribution of UWB Signals,"J. Lightwave Technol., vol.27, no.14, pp.2649-2657, July, 2009.
- [19] A. Stöhr et al, "60 GHz radio-over-fiber technologies for broadband wireless services,"J. Optical Networking, Vol. 8, No. 5 pp. 471-487, Mayo 2009.
- [20] Zhang Chunlei; Geng Ling; Zhang Pengtu; , "An overview of integration of RoF with PON,Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference on , vol.15, no., pp.V15-40-V15-43, 22-24 Oct. 2010.

- 
- [21] M Milosavljevic, P. Kourtessis and A. Gliwan, "Advanced PON topologies with wireless connectivity," Transparent Optical Networks 11th International Conf., São Miguel, 2009, pp.1-4.
- [22] G. E. Campos, G. P. Sabogal, "Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica," *Umbral Científico Redalyc*, N°. 9, pp. 76-84, Sep., 2006.
- [23] T. Taniguchi, N. Sakurai, H. Kimura and K. Kumozaki, "Technical Trends in Millimeter-wave Band Radio-On-Fiber Access System", *PIERS Proc.*, Beijing, 2009, pp. 24-27.
- [24] C. Lin; J. Chen, P- Peng-Chun, P. Cheng-Feng, P. Wei-Ren, C Bi-Shiou, S. Chi, "Hybrid Optical Access Network Integrating Fiber-to-the-Home and Radio-Over-Fiber Systems," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.19, no.8, pp.610-612, April, 2007.
- [25] M. Fabbri and P. Faccin, "Radio over Fiber Technologies and Systems: New Opportunities," *Transparent Optical Networks 9th International Conf*, Rome, vol.3, 2007, pp.230-233.
- [26] Z. Yong, T.Wong, "Prospects of CMOS technology for millimeter-wave radio-over-fiber applications," *Microwave and Millimeter Wave Technology International Conf.*, Chengdu, 2010, pp. 476-479, 8-11 May 2010.
- [27] J. Mitchell, "Radio over fibre networks: Advances and challenges," *Optical Communication 35th European Conf.* , Vienna, 2009, pp.1-4, 20-24.
- [28] A. Stohr, "10 Gbit/s wireless transmission using millimeter-wave over optical fiber systems," *Optical Fiber Communication Conf.*, Los Angeles, CA, 2011, pp.1-3, 6-10.
- [29] F. M. Kuo et al. "Spectral Power Enhancement in a 100 GHz Photonic Millimeter-Wave Generator Enabled by Spectral Line-by-Line Pulse Shaping" *IEEE J. Photonics*, Vol. 2, No. 5, pp. 719-727, Oct 2010.
- [30] S. Z. Pinter, X. N. Fernando, "Estimation and equalization of fiber-wireless uplink for multiuser CDMA 4G networks," *IEEE Trans. Communications*, Vol.58, No.6, pp.1803-1813, June 2010.
- [31] J. Company, D. Novak "Microwave photonics combines two worlds" *Nature Photonics*, Vol. 1, pp. 319-330, June 2007.
- [32] E. K. Lau, S. Hyuk-Kee, M. C. Wu, "Ultra-high, 72 GHz resonance frequency and 44 GHz bandwidth of injection-locked 1.55- $\mu\text{m}$  DFB lasers," *Optical Fiber Communication National Fiber Optic Engineers Conf.*, Los Angeles, CA, 2006 , pp., 5-10.

- [33] L. Chrostowski; X. Zhao, C.J. Chang-Hasnain, R. Shau, M. Ortsiefer; M. C. Amann, "50-GHz optically injection-locked 1.55-nm VCSELs," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, no.2, pp.367-369, Jan., 2006.
- [34] J. Perez, "Coexistencia e integración de comunicaciones Inalámbricas en Sistemas de Transmisión Ópticos," Ph.D Dissertation, Dept. Electr. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2009.
- [35] J. Wen-Jr, L. Chun-Ting, A. Ng'oma, S. Po-Tsung, J. Chen, M. Sauer, F. Annunziata, C. Sien, "Simple 14-Gb/s Short-Range Radio-Over-Fiber System Employing a Single-Electrode MZM for 60-GHz Wireless Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol.28, no.16, pp.2238-2246, Aug, 2010.
- [36] C. Haoshuo, R. Lin, "Schemes of generating M-ASK signals and remote local oscillator at millimeter-wave band in Radio over Fiber system," *Communications and Photonics Conf. Shanghai*, 2009, pp.1-6.
- [37] H. Yang, J. Zeng, Y. Zheng, H. Jung, B. Huiszoon, J. van Zantvoort, E. Tangdiongga, A. M. Koonen, "Evaluation of effects of MZM nonlinearity on QAM and OFDM signals in RoF transmitter," *Asia-Pacific Microwave Photonics Conf. Gold Coast*, 2008. pp. 90-93.
- [38] F. Grassi, J. Mora, B. Ortega, and J. Capmany, "Radio over fiber transceiver employing phase modulation of an optical broadband source", *Optics Express*, Vol. 18, pp.21750-21756, Sep., 2010.
- [39] C. Qingjiang, L. Qiang, Z. Ziyang, Q. Min and S. Yikai, "Micrometer-scale optical up-converter using a resonance-split silicon microring resonator in radio over fiber systems," *Optical Fiber Communication Conf.*, San Diego, CA, 2009, pp.1-3.
- [40] M. Weiß, M. Huchard, A. Stöhr, B. Charbonnier, S. Fedderwitz, and D. Stefan, "60-GHz photonic millimeter-wave link for short- to medium-range Wireless transmission pp to 12.5 Gb/s", *J. Lightw. Technol.*, vol. 26, no. 15, pp.2424-2429, Aug., 2008.
- [41] H.S. Kang and W.Y. Choi, "Millimeter-wave optoelectronic mixers based on CMOS-compatible Si photodetectors", *Int. Topical Meeting on Microwave Photonics*, Grenoble, 2006, pp.1-4.
- [42] J.W. Kunze, C. Weyers, P. Mayr, A. Bilgic and J. Hausner, "60 GHz compact low noise amplifier in 65 nm CMOS", *IEEE Electron. Device Lett.*, vol. 45, no.20, pp.1035-1036, Sept., 2009.
- [43] M. Lucente, C. Stallo, T. Rossi, S. Mukherjee, E. Cianca, M. Ruggieri and V. Dainelli, "Analysis and design of a point-to-point radio-link at W band for future satellite telecommunication experiments," *IEEE Aerospace Conf., Big Sky*, 2011, pp.1-10.

- [44] M. Al-Noor, J. Loo, and R. Comley, "WiMAX 54Mbit/s over radio over fibre using DCF, SMF fibre and FGB for fibre over 410km," *Wireless Communication Systems 7th International Symp.*, York, 2010, pp.829-833.
- [45] M. Al-Noor, L. Kok-Keong and R. Comley, "120 Mbps Mobile WiMAX Scalable OFDMA Signal Transmission over RoF with SMF, DCF and Chirped FBG for Fibre Length of 792 km," *Wireless and Mobile Communications 6th Int. Conf.*, Valencia, 2010, pp. 373-377.
- [46] Y. Jianjun, H. Junqiang, Q. Dayou, J. Zhensheng, C. K. Geeg and W. Ting, "Transmission of microwave-photonics generated 16Gbit/s super broadband OFDM signals in radio-over-fiber system", *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conf.*, 2008., San Diego, CA , pp.1-3, 24-28.
- [47] Y. Pi, Z. Dong, L. Chen and J. Yu, "A Radio-over-Fiber System for Simultaneous Generation of Wired and Wireless Services", *Proc. of SPIE Vol. 7136*, pp. 71361K-71361k-9, Nov., 2008.
- [48] A. Ng'oma, D. Fortusini, D. Parekh, W. Yang, M. Sauer, S. Benjamin, W. Hofmann, M. Amann and C. Chang-Hasnain, "Performance of a Multi-Gb/s 60 GHz Radio Over Fiber System Employing a Directly Modulated Optically Injection-Locked VCSEL," *J. Lightw. Technol.*, vol.28, no.16, pp. 2436-2444, Aug., 2010
- [49] N. Guerrero, "Digital Photonic Receivers for Wireless and Wireline Optical Fiber Transmission Links," PhD. Dissertation, Dept. Fotonik, Denmark Tech. Univ, Copenhagen, 2011.
- [50] A. Caballero, D. Zibar, and I. Tafur Monroy. "Digital Coherent detection of multi-gigabit 40 GHz carrier frequency radio-over-fiber signals using photonic downconversion." *IEEE Electron. Lett.*, vol. 46 No. 1, pp. 57-58, Jan 2010.
- [51] N. Guerrero, D. Zibar, A. Caballero and I. Tafur, "Experimental 2.5-Gb/s QPSK WDM Phase-Modulated Radio-Over-Fiber Link With Digital Demodulation by a k-Means Algorithm," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 22, No. 5, pp. 335-337, Feb., 2010.
- [52] H. Joshi, R. J. Green, M. S. Leeson, "Multiple sub-carrier optical wireless systems," *Transparent Optical Networks 10th Anniversary International Conf.*, Athens, 2008, vol.4, no.1, pp.184-188, 22-26.
- [53] J. Ho-Chul, K. Hoon, C. Yun, "Full-Duplex Radio-Over-Fiber System Using Phase-Modulated Downlink and Intensity-Modulated Uplink," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.21, no.1, pp.9-11, Jan.1, 2009.

- [54] W. Baluja, C. Anías, "Experiences in Planning and Implantation of Security at Next Generation Networks," *IEEE Latin America Trans.* vol.8, no.6, pp.703-707, Dec. 2010.
- [55] S. K. Mohapatra, "Integrated planning for Next Generation Networks," *IEEE Int. Symp. Integrated Network Management-Workshops*, 2009., New York, pp.205-210.
- [56] P. A. Gamage, A. Nirmalathas, C. Lim, D. Novak, R. Waterhouse, "Experimental Demonstration of the Transport of Digitized Multiple Wireless Systems Over Fiber," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.21, no.11, pp.691-693, June, 2009.
- [57] T. Kamisaka, T. Kuri, K. Kitayama, "Simultaneous modulation and fiber-optic transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz-band radio signals on a single wavelength," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol.49, no.10, pp.2013-2017, Oct, 2001.
- [58] W. Yong-Yuk, K. Hyun-Seung, S. Yong-Hwan, H. Sang-Kook, "Full Colorless WDM-Radio Over Fiber Access Network Supporting Simultaneous Transmission of Millimeter-Wave Band and Baseband Gigabit Signals by Sideband Routing," *J. Lightw. Technol.*, vol.28, no.16, pp.2213-2218, Aug., 2010.
- [59] J. Yin, K. Xu, Y. Li; X. Sun, L. Gui, J. Wu, X. Hong and J. Lin, "Demonstration of 2.5Gb/s optical PSK signal and the ASK wireless transmission based on heterodyne detection in a radio-over-fiber platform," *Int. Topical Meeting Microwave Photonics*, Valencia, 2009. pp.1-3.
- [60] E. Dadrasnia and F. Adikan, "DWDM effects of single model optical fiber in radio over fiber system," *Electronic Computer Technol. Int. Conf.*, Kuala Lumpur, 2010 pp.39-41.
- [61] José Luis Jiménez Peñaloza, "Caracterización del modulador electro-óptico APEtm microwave analog intensity con aplicación de transmisión de video compuesto" tesis Msc. Ing electrónica UDLAP, 2005.
- [62] V. Vorgelegt, "Radio over Fiber based Network Architecture," Ph.D. Dissertation, Dept. Elect., Tech. Berlin Univ. Berlin, 2005.
- [63] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [64] <http://fortiz.8k.com/ConceptosBasicos/Tema07-DispersionDesplazada.htm>
- [65] Seb J. Savory, "Digital filters for coherent optical receivers," *Optic Express*, Vol 16. No.2, Jan. 2008.
- [66] Gliese, U.; Norskov, S.; Nielsen, T.N.; , "Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links," *Microwave Theory and Techniques*, *IEEE Transactions on* , vol.44, no.10, pp.1716-1724, Oct 1996.

- [67] Hilt, A.; Vilcot, A.; Berceci, T.; Marozsak, T.; Cabon, B.; , "New carrier generation approach for fiber-radio systems to overcome chromatic dispersion problems," Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International , vol.3, no., pp.1525-1528 vol.3, 7-12 Jun 1998.
- [68] <http://www.vpiphotonics.com/TMOpticalSystems.php>
- [69] Meslener, G.; "Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection," Quantum Electronics, IEEE Journal of , vol.20, no.10, pp. 1208- 1216, Oct 1984.
- [70] Ki-Hyuk Lee; Hyun-Yong Choi; Woo-Young Choi; , "Analysis of chromatic dispersion-induced second-harmonic distortions including laser dynamics to the second order," Quantum Electronics, IEEE Journal of , vol.39, no.5, pp. 640- 646, May 2003.
- [71] Lethien, C.; Loyez, C.; Vilcot, J.-P.; , "Potentials of radio over multimode fiber systems for the in-buildings coverage of mobile and wireless LAN applications," Photonics Technology Letters, IEEE , vol.17, no.12, pp. 2793- 2795, Dec. 2005.
- [72] Grassi, F.; Mora, J.; Ortega, B.; Capmany, J.; , "Experimental evaluation of the transmission in a low cost SCM/WDM radio over fibre system employing optical broadband sources and interferometric structures," Transparent Optical Networks, 2009. ICTON '09. 11th International Conf. pp.1-4, June 28 2009 - July 2 2009.
- [73] Hong-Yeh Chang; Huei Wang; Lin, W.; , "A Miniature 35-110 GHz Modified Reflection-type BPSK Modulator Using 65-nm CMOS Technology," Microwave Symposium, 2007. IEEE/MTT-S Int., pp.2165-2168, 3-8 June 2007
- [74] Michael D. McKinley, Kate A. Remley , Maciej Mysliniski, J. Stevenson Kenney , Dominique Schreurs, Bart Nauwelaers, "EVM Calculation for Broadband Modulated Signals", 64th ARFTG Conf. Dig. Orlando, FL, pp. 45-52, dec. 2004.
- [75] Yan Li; Lei Li; , "A Novel Split and Merge EM Algorithm for Gaussian Mixture Model," Natural Computation, 2009. ICNC '09. Fifth International Conference on , vol.6, pp.479-483, 14-16 Aug. 2009.
- [76] Chris Bishop, "Patter Recognition and Machine Learning", Springer 2006, ISBN-10: 0-387-31073-8.
- [77] Michael Alder, "An introduction to pattern recognition", HeavenForBooks.com, 2001.