Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electrónica

Diseño y simulación de un sistema de transmisión de fibra óptica en banda base y con múltiples subportadoras de RF

Tesis presentada por: Diego Felipe Pintor Goyeneche
para obtener el título de Ingeniero Electrónico

Director: Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón

2017
Bogotá D.C, Colombia

Índice general

1. Generalidades **1**
1.1. INTRODUCCIÓN . . . 1
1.2. PROBLEMA . . . 3
1.3. JUSTIFICACIÓN . . . 4
1.4. OBJETIVOS . . . 5
1.4.1. Objetivo General . . . 5
1.4.2. Objetivos Específicos . . . 5

2. Estado del Arte **6**
2.1. Características de la fibra óptica . . . 6
2.1.1. Atenuación . . . 7
2.1.1.1. Coeficiente de atenuación . . . 7
2.1.1.2. Absorción del material . . . 8
2.1.1.3. Rayleigh Scattering . . . 9
2.1.1.4. Imperfecciones de la guía de onda . . . 10
2.1.2. Dispersión . . . 10
2.1.2.1. Dispersión Modal . . . 11
2.1.2.2. Dispersión Cromática . . . 11
2.1.2.3. Dispersión PMD . . . 12
2.1.3. Efectos no lineales . . . 13
2.1.3.1. Modulación de fase inducida SPM . . . 13
2.1.3.2. Modulación de fase cruzada XPM . . . 14
2.1.3.3. Dispersión estimulada de Raman SRS . . . 14
2.1.3.4. Dispersión estimulada de Brillouin SBS . . . 15
2.1.3.5. Mezcla de Cuarta Onda FWM . . . 15
2.2. Fuentes ópticas . . . 16
2.2.1. Diodo LED . . . 19
2.2.1.1. LED a partir de heterounión . . . 20
2.2.1.2. LED de emisión lateral . . . 21
2.2.1.3. LED de emisión superficial . . . 21
2.2.1.4. LED superradiante . . . 22
2.2.2. Diodo Láser . . . 23
2.2.2.1. Láser Fabry-Perot . . . 24
2.2.2.2. Láser DFB . . . 26
2.2.2.3. Láser SEL . . . 27
2.3. Modulación óptica . . . 29
2.3.1. Modulación Directa . . . 31
2.3.2. Modulación Externa . . . 31
2.3.2.1. Moduladores Electro-ópticos . . . 32
2.3.2.2. Moduladores de Electro-absorción . . . 34
2.4. Métodos de generación de RoF . . . 36

2.4.1. Generación en brazo doble 37
2.4.2. Generación en paralelo 38
2.4.3. Generación en serie 39

3. Transmisión de una subportadora de RF 41
3.1. Generador y sus características 43
3.2. Portadora de RF y sus características 45
3.3. Modulador óptico y sus características 48
3.4. Canal óptico y sus características 49
3.5. Sistema de recepción y sus características 50
3.6. Efecto de supresión de portadora 52

4. Transmisión de dos subportadoras de RF 53
4.1. Primer método de generación de dos subportadoras 54
4.1.1. Recepción mediante el filtrado en el dominio eléctrico 56
4.1.2. Recepción mediante el filtrado en el dominio óptico 57
4.1.3. Recepción mediante la supresión de portadora óptica 57
4.1.4. Comparación de los tres métodos de recepción 58
4.2. Segundo método de generación de dos subportadoras 60
4.3. Comparación de los dos métodos de generación 62

5. Transmisión de tres subportadoras de RF 63

6. Transmisión de tres señales RF y banda base 67

7. Conclusiones 71

Índice de figuras

2.1. Curva de pérdidas de una fibra óptica 8
2.2. Propagación intermodal en una fibra de índice escalonado 11
2.3. (a) Perfil de intensidad del modo m=0 en la fibra. (b) Perfil del pulso de salida si poca luz viaja por el recubrimiento. (c) Perfil del pulso de salida si mucha luz viaja por el recubrimiento. 12
2.4. (a) Propagación de dos modos transversales ortogonales en una fibra monomodo ideal; (b) propagación de dos modos transversales ortogonales en una fibra monomodo real. Aparece la dispersión de modos de polarización (PMD). 13
2.5. Principio de la Dispersión Estimulada de Raman 14
2.6. Señal a una longitud de onda $\lambda = 1550$nm, y onda dispersada que se genera debido a SBS 15
2.7. Efecto de FWM en tres señales equidistantes 16
2.8. Anchura espectral de un LED y láser 17
2.9. Procesos fundamentales que ocurren entre los dos niveles de energía de un átomo 18
2.10. LED de heterounión: utiliza un semiconductor de GAP estrecho para la región activa. Los fotones emitidos no se absorben por las capas superior o inferior que son transparentes para la radiación emitida 20
2.11. Esquema de un LED de emisión lateral. Las capas de confinamiento provocan que la luz salga al exterior por el borde del LED 21
2.12. Esquema de un LED de emisión superficial. El LED tiene una fibra pegada a su superficie. 22
2.13. (a) La luz es acoplada desde la superficie emisora del LED a la fibra multimodo mediante el uso de un material (resina) con índice de refracción adecuado. (b) Una microlente focaliza la luz divergente emergente desde la superficie del LED hacia la fibra óptica multimodo. 22
2.14. (a) Estructura láser típica donde se ven los espejos y la cavidad utilizada para confinar los fotones. (b) Estados estacionarios de la cavidad. Los espejos son los responsables de estos estados. 24
2.15. (a) Láser de geometría de tiras, (b) el láser de perfil rectangular, (c) inyección de corriente en el láser 25
2.16. Cavidades láseres guiadas por índice 26
2.17. Las ondas parcialmente reflejadas en las arrugas interferirán constructivamente constituyendo una onda reflejada cuando la longitud de onda satisfaga la condición de Bragg 27
2.18. Diodo láser de realimentación distribuida (DFB) (a) Un diodo láser DFB. (b) Como trabaja la realimentación distribuida. (c) Espectro de la radiación de salida 28

2.19. (a) Esquema de la localización de los reflectores DBR en un láser de emisión superficial. Se muestra esquema de la reflectividad. (b) Estructura típica de un DBR de GaAs / AlAs. (c) Estructura de DBR utilizando apilamientos de materiales amorfos. 29
2.20. Circuito básico de polarización y modulación directa 31
2.21. Modulador MZ de doble brazo 32
2.22. Curva de transferencia de potencia de un modulador MZ 33
2.23. (a) Estructura tipida de un EAM integrado con un láser DFB en el mismo sustrato de fosfuro de indio (InP); (b) Empaque de un EAM de Huawei del Centro de Fotónica Integrada de Inglaterra 35
2.24. Curva de transferencia de un EAM 36
2.25. Modelo de modulación externa con dos brazos con MZ 37
2.26. Esquema de modulación externa con dos moduladores MZ en paralelo . 38
2.27. Esquema de modulación externa con dos moduladores MZ en serie . . . 39

3.1. Configuración del generador a partir de un láser de onda continua (CW Láser) 43
3.2. Espectro de frecuencia del láser configurado 44
3.3. Configuración del generador pseudo-aleatorio de bits 45
3.4. Configuración del bloque generador de la señal NRZ 45
3.5. Señal generada por el bloque NRZ. 46
3.6. Configuración del bloque modulador eléctrico AM 46
3.7. Datos a 2.5 Gbps modulados por una portadora de 15 GHz 47
3.8. Espectro de frecuencia de la señal de datos modulados a 10GHz 47
3.9. Configuración del MZM de un brazo 48
3.10. Parámetros básicos de la fibra óptica utilizada 49
3.11. Parámetros relacionados a la dispersión de la fibra 49
3.12. Bloques utilizados en el sistema de recepción 50
3.13. Parámetros del fotodetector 50
3.14. Parámetros del filtro pasa banda 50
3.15. Parámetros del demodulador AM 51
3.16. Diagrama de ojo de la señal recibida, distancia: 50 km, frecuencia subportadora: 15 GHz, ancho de banda de -3dB: 2.5 GHz, factor de "roll-off": 0.25. 51
3.17. Resultados obtenidos para un enlace de RoF con una subportadora de 10 GHz. Izquierda: Gráfica de $10\log_{10}\left[cos\left(\frac{1}{2}\beta_2 L\Omega^2\right)\right]$. Derecha: Gráfica de los resultados obtenidos en simulación. 52

4.1. Método utilizado para la generación de dos subportadoras de RF mediante la suma de subportadoras 54
4.2. Parámetros del modulador Mach Zehnder de doble brazo 55
4.3. Sistema de recepción para recuperar las dos subportadoras 55
4.4. Resultados de los BER obtenidos variando los parámetros de factor de caída y ancho de banda a -3dB. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 19 GHz. 56
4.5. Esquema de simulación del filtrado en el dominio óptico mediante FBG 57
4.6. Esquema de simulación de la recepción de los datos mediante la supresión de la portadora óptica 58
4.7. Comparación de los resultados obtenidos con los tres métodos de recepción utilizados. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz. 58

4.8. Comparación de los resultados obtenidos con los tres métodos de recepción utilizados. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz. 59
4.9. Método de generación dos subportadoras mediante dos MZM y el acoplamiento de las señales 60
4.10. Comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos de recepción utilizados. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz. 61
4.11. Comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos de transmisión y los métodos de recepción. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz. 62

5.1. Método de generación de tres subportadoras de RF 63
5.2. Método de recepción de tres subportadoras de RF 64
5.3. Resultados obtenidos a la salida del sistema de transmisión de 3 subportadoras de RF. Izquierda: Bit Error Rate. Derecha: Interferencia entre simbolos 64
5.4. Comparación de los resultados de BER de la transmisión de dos subportadoras y la transmisión tres subportadoras. Izquierda: Subportadora de 10 GHz. Derecha: Subportadora de 30 GHz 65
5.5. Comparación de los resultados de ISI de la transmisión de dos subportadoras y la transmisión tres subportadoras. Izquierda: Subportadora de 10 GHz. Derecha: Subportadora de 30 GHz 65

6.1. Método de generación de tres subportadoras de RF e información en banda base 67
6.2. Método de recepción de tres subportadoras de RF e información en banda base 68
6.3. Comparación de los resultados de BER de la transmisión de tres subportadoras y la transmisión tres subportadoras junto con banda base. Izquierda-Arriba: Subportadora de 10 GHz. Derecha-Arriba: Subportadora de 20 GHz. Centro-Abajo: Subportadora de 30 GHz. 68
6.4. Comparación de los resultados de ISI de la transmisión de tres subportadoras y la transmisión tres subportadoras junto con banda base. Izquierda-Arriba: Subportadora de 10 GHz. Derecha-Arriba: Subportadora de 20 GHz. Abajo: Subportadora de 30 GHz. 69
6.5. Resultados obtenidos de la señal transmitida en banda base. Izquierda-Arriba: Resultados del BER. Derecha-Arriba: Resultados del ISI. Abajo: Diagrama de ojo a una distancia de 20 km 70

Capítulo 1

Generalidades

1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las altas necesidades y requerimientos de las empresas y usuarios en general son cada vez más altas, en cuanto a términos de comunicaciones y conexión se refiere, las tecnologías que se han venido utilizando a través del siglo XX han quedado casi que obsoletas en comparación con los nuevos avances en las lineas de transmisión. Las tecnologías usadas anteriormente tales como el par trenzado el cual consta de un ancho de banda máximo de 100MHz y una tasa de transmisión de hasta 100Mbps [1] o el cable coaxial que se caracteriza por tener un ancho de banda máximo de 450MHz y una tasa de transmisión de hasta 150Mbps [2], se han quedado desfasadas respecto a los requerimentos del siglo XXI. Estos medios de transmisión que suplieron la necesidad de transmitir datos hace 60 o 70 años poco a poco van siendo reemplazadas por la fibra óptica (por ejemplo FTTH, *fiber to the home*), esta tecnología permite una capacidad de transmisión de 100GHz-km [3] y una tasa de transmisión de cientos de Gpbs [4]; utilizar fibra óptica como linea de transmisión ha sido un avance muy importante en las comunicaciones, si bien es cierto que es costoso implementarla, una vez instalada ofrece muchas posibilidades y suple las necesidades de los respectivos usuarios.

A pesar de las ventajas que ofrece, la fibra óptica sigue sin ser demasiado utilizada en los tramos finales, es decir, en tramos desde el nodo central hasta el bucle de abonado. Es por ello que esta parte de a red normalmente es de cobre, y los usuarios sufren las limitaciones de las líneas de suscripción digital (xDSL) y las líneas fibra-coaxial. (HFC). Estas limitaciones estan presentes debido al elevado costo de la conexión de cada abonado al nodo central [7].

Asumiendo el mejor de los casos se utiliza la tecnología FTTH, la cual consta escencialmente en la entrega de una señal de comunicaciones sobre fibra óptica desde el equipo de conmutación de un operador hasta un hogar o negocio, reemplazando así la infraestructura de cobre existente, tal como hilos telefónicos y cable coaxial. Fibra hasta el hogar es un método relativamente nuevo y de rápido crecimiento para proveer un ancho de banda mayor a consumidores y empresas, por lo tanto permitiendo servicios más robustos de video, internet y voz [6].

Por otra parte RF (*radio frequency*) término que se refiere a cualquiera de las frecuencias que se encuentran en el intervalo que va desde alrededor de 3 kHz a 300 GHz, que incluyen las frecuencias utilizadas para comunicaciones o señales de radar [8], generalmente se habla de espectro radioeléctrico. En este rango de frecuencias, actualmente se transmiten varios servicios en Colombia tales como, comunicaciones móviles (3G en

850 MHz y 1900 MHz, 4G en 1700 MHz - 2100 MHz y 2600 MHz), radiodifusión de televisión digital terrestre TDT (desde 470 MHz hasta 608 MHZ) y radionavegación tanto aeronáutica como marítima (en la banda SHF desde 3GHz hasta 30 GHz), tal como se puede observar estos servicios se transmiten de manera inálambrica.

Los medios de transmisión se agrupan en medios guiados como los mencionados anteriormente (par trenzado, cable coaxial y fibra óptica) y medios no guiados (como la transmisión inalámbrica terrestre, los satélites y los láseres a través del aire). Nuestra era ha dado origen a los adictos a la información: personas que necesitan estar todo el tiempo en línea. Para estos usuarios no son de utilidad el par trenzado, el cable coaxial ni la fibra óptica. Para estos usuarios la comunicación inalámbrica es la respuesta. La tecnología inalámbrica ofrece ventajas para dispositivos fijos en ciertos casos. Por ejemplo, si es dificil tender una fibra hasta un edificio debido al terreno (montañas, junglas, pantanos, etc), tal vez sea mejor usar tecnología inalámbrica [5].

Utilizar las ventajas que ofrece la fibra óptica en términos de ancho de banda y velocidad de transmisión, junto con la versatilidad de las transmisión de información a través de una portadora de radiofrecuencia, puede ser fundamental a la hora de optimizar un enlace ya establecido. Por ejemplo un enlace de fibra optica establecido anteriormente, en el que pueda transmitir información en portadoras de RF, esto fue implementado utilizando la tecnología de RoF (*Radio over fiber*). Un enlace de RoF consiste en el hardware necesario para colocar una señal de RF en una portadora óptica, el enlace de fibra óptica y el hardware requerido para recuperar la señal RF de la portadora. Las redes inalámbricas basadas en tecnologias de RoF han sido porpuestas como una prometedora solución costo-efectiva para satisfacer el aumento del ancho de banda y las demandas inalámbricas [9].

1.2. PROBLEMA

Actualmente estamos en una era en la que se transmite millones de bits de información diariamente alrededor del mundo, estos datos corresponden a comunicaciones a través de redes empresariales, servicios ofrecidos por las empresas de telecomunicaciones tales como televisión con alta calidad de imagen, acceso a Internet de banda ancha y múltiples servicios que actualmente se ofrecen principalmente sobre el protocolo IP, todos estas prestaciones, en general con el paso del tiempo requieren dos cosas muy importantes para una transmisión y recepción optima de la información, primero se necesitan grandes capacidades de ancho de banda y segundo las altas velocidades de transferencia de datos que se requieren para una óptima experiencia de usuario. La compañia Cisco Systems pronostica que el tráfico IP pasará de 1 zettabyte en el 2016 a 2 zettabytes en el 2019, divididos en 1,348 zettabytes de banda ancha, 0,382 de los proveedores de servicios de Internet (Internet Service Provider - ISP) y 0,291 a través de datos moviles [11].

El actual pronóstico del indice de redes visuales (VNI, *Visual Networking Index*) de Cisco proyecta que el tráfico mundial tan solo de IP, se triplicará a del 2015 al 2020. Se espera que el tráfico total de los servicios IP crezca 194 exabytes (EB) por mes en 2020, frente a los 72.5 EB por mes en 2015, una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR, *Compound annual growth rate*) del 22 por ciento. Este crecimiento es poco respecto a la tasa de crecimiento para el año 2014 al 2019, que fue de 23 por ciento. Se estima que el crecimiento del tráfico IP se estabiliza en el rango de 20 a 25 por ciento [12].

Se busca una solución parcial o total para suplir las necesidades de la sociedad actualmente, sabiendo que ya hay sistemas que juntan las ventajas de la fibra óptica como línea de transmisión y la versatilidad que ofrecen las comunicaciones inalámbricas, para ello se han diseñado sistemas de transmisión en donde una señal de datos es modulada por una portadora de RF y transmitida a través de un enlace de fibra óptica (RoF), tecnología que permite optimizar la parte de generación de datos, reemplazando la utilización de varios canales con tecnologías generalmente de cable coaxial, y unificarlas mediante un solo canal de fibra óptica.

Con el fin de dar solución al problema ello se han venido diseñando sistemas que combinan la transmisión de datos en banda base con tecnología FTTH y transmisión de señales de RF (tecnología RoF) a través de un mismo hilo de fibra. FTTH y RoF son dos tecnicas prometedoras para para el futuro de las redes de acceso a multiservicios, facilitando la transmisión de señales de radio frecuencia y banda base a través de una sola longitud de onda sobre un único hilo de fibra utilizando un modulador Mach Zehnder [13].

Para suplir aun mejor las necesidades se ha propuesto combinar estas dos tecnologías de Radio sobre Fibra (RoF) y fibra hasta el hogar (FTTH) como se señaló anteriormente,con el fin de diseñar un sistema que esté en la capacidad de transportar información en banda base (BB) y además agregando más subportadoras de RF, toda esta información transmitida mediante un hilo de fibra y una sola longitud de onda en banda óptica en tercera ventana.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las tasas de transmisión de información sin lugar a dudas crecerán de forma exponencial con el transcurrir del tiempo, debido a los varios servicios que requieren grandes anchos de banda, para suplir estas necesidades se están utilizando nuevas tecnologías de transmisión como la fibra óptica la cual tiene muchas ventajas en cuanto a ancho de banda y atenuación, si de alguna forma se combina la tecnología de fibra óptica con la transferencia de información de forma inalámbrica se puede obtener un sistema que transmita datos inalámbricamente hasta dispositivos móviles y al mismo tiempo transmitir información directamente en banda base entre estaciones.

El aumento en el ancho de banda que precisa un usuario final de la red se traduce en la necesidad de poder disponer de redes de transporte capaces de soportar un *tráfico agregado* (obtenido al sumar los tráficos de los usuarios finales) por encima de varios cientos de *Gigabit por segundo* e incluso por encima del *Terabit por segundo*. En la actualidad, solo la tecnología de fibra y en concreto la basada en sistemas de transmisión de canales por multiplexación densa de longitud de onda (DWDM) puede hacer frente a este incremento en la demanda [14]. Por lo tanto es necesario optimizar de la mejor manera el uso de las longitudes de onda, objetivo que se puede logar transmitiendo dos o más servicios a través de una sola longitud de onda.

Un transmisor de RF tiene como misiones, generar una señal portadora, modular los datos, amplificar la señal para logar el nivel deseado y por último filtrar para irradiar a través de una antena [15] .El proceso de transmisión de un único mensaje se logra a través de una única antena. Si se logran transmitir a través de un hilo de fibra varios servicios de RF, se puede optimizar la utilización de antenas. Si en algún punto de la red se requiere irradiar al espacio libre la información, solo sería necesario utilizar una antena para transmitir dos o más servicios.

Recientemente, los sistemas microcelulares de fibra óptica, en los que las microceldas ubicadas en un área amplia están conectadas por fibra óptica y se transmiten señales de radio a través de un enlace de fibra óptica entre estaciones base y estaciones de control, han atraído mucha atención [16]. Se han implementado sistemas que transmiten información en banda base y una portadora de RF a través de un enlace de fibra. Si se logra implementar un sistema de radio sobre fibra utilizando múltiples subportadoras (SCM), permite mejorar de forma considerable aspectos como ancho de banda y la optimización de recursos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema de transmisión de fibra óptica basado en Radio sobre Fibra (Radio over Fiber), en el cual se transmita información en banda base y múltiples subportadoras de RF utilizando una sola longitud de onda.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar los métodos de generación de señales para sistemas de radio sobre fibra
- Reconocer diferentes tipos de servicios en radiofrecuencia que se puedan enviar sobre un sistema de radio sobre fibra.
- Diseñar el sistema de generación de múltiples subportadoras de RF que junto con la información en banda base serán transmitidas a través de un solo enlace de fibra óptica.
- Evaluar las características de capacidad de ancho de banda y velocidad de transmisión que puede soportar el sistema.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se presenta de manera resumida algunos parámetros y aspectos importantes relacionados con los sistemas de comunicación a través de fibra óptica. Primero algunas características importantes de la fibra óptica tales como, la atenuación la cual se describe mediante un coeficiente y que es causada por tres efectos, la absorción del material, la dispersión Rayleigh y las imperfecciones de la guía de onda; el fenómeno de la dispersión, el cual se presenta en fibras multimodo (dispersión modal), en fibras monodomo (dispersión cromática) y la dispersión PMD; finalmente los efectos no lineales que se presentan en la fibra óptica, tales como la modulación de fase, los fenómenos no lineales de la dispersión y la mezcla de cuarta onda.

Luego se presentan los tipos de fuentes generadoras en los sistemas ópticos los cuales pueden ser LED o Láser. En el caso de la generación de portadora mediante LED, se presentan diferentes tipos tales como, el LED partir de una heterounión, el LED de emisión lateral, el LED de emisión superficial y el LED superradiante. De igual manera con el diodo Láser en el cual se mencionan el Láser Fabry-Perot, el Láser DFB y el Láser SEL.

Posteriormente se presentan los tipos de modulación que puede utilizar un sistema de comunicaciones óptico, en donde la modulación se puede realizar de dos maneras, de forma directa cuando los datos son llevados directamente al diodo o de forma externa utilizando un dispositivo adicional al diodo generador; en la modulación externa se puede hacer de dos maneras dependiendo de la utilización del dispositivo adicional, con dispositivos electro-ópticos o utilizando un mismo sustrato para el diodo y el modulador.

Por último ya nos centramos en los sistemas de radio sobre fibra y en los métodos de generación de una señal de este tipo la cual se puede realizar de tres maneras distintas, en brazo doble utilizando un modulador externo de doble brazo, o si se utilizan moduladores de un solo brazo dicha modulación se puede realizar en paralelo o en serie.

2.1. Características de la fibra óptica

En los sistemas de transmisión y comunicaciones ópticos se deben tener presentes algunos aspectos importantes, ya que como cualquier medio de transmisión, hay algunas propiedades y características que tiene la fibra óptica, tanto la fibra óptica monomodo (SMF) como la fibra multimodo (MMF). En particular la pérdida de la potencia transmitida a través de la fibra óptica, efecto conocido como *atenuación* y

el ensanchamiento del pulso de la información transmitida a través de la fibra óptica, efecto conocido como *dispersión*.

La atenuación y la dispersión son los dos efectos que desempeñan un papel importante en los sistemas de transmisión de fibra óptica. La atenuación de la señal óptica limita la disponibilidad de potencia óptica a lo largo del enlace de transmisión. Las pérdidas de la fibra fueron reducidas de 100 dB/km (transmisión realizada a lo largo de unos pocos metros) a 1300 nm en 1970 a 0.25 y 0.15 dB/km, las cuales son muy cercanas al limite teórico posible, transmitiendo a través de cientos de kilómetros en las longitudes de onda de 1300 y 1550 nm respectivamente en 1980.

La dispersión de la fibra óptica también ha sido reducida debido a el "diseño inteligente" de las estructuras de la misma. A principios de 1970, se vio un notable desarrollo de las teorías para entender el guiado de la luz en la fibra multimodo. El progreso en la reducción de las pérdidas de la fibra óptica y la capacidad de fabricar fibras con el diámetro del núcleo muy pequeño permitió del diseño de la fibra óptica monomodo.

De la misma manera que la atenuación y la dispersión que está presente en las comunicaciones ópticas, también pueden existir los *efectos no lineales de la fibra*. Estos efectos juegan un papel importante en la transmisión de pulsos ópticos a través de fibras monomodo. Los efectos no lineales pueden ser clasificados en tres tipos: los efectos que cambian el indice de refracción del medio guiado debido a la intensidad del pulso, la modulación SPM (self-phase modulation); la dispersión del haz de luz hacia otras ondas ópticas desplazadas en frecuencia cuando la intensidad alcanza cierto umbral, el fenómeno de dispersión de Brillouin y Raman; y la combinación de las ondas ópticas para general una cuarta onda, la degeneración FWM (four wave mixing) [27].

2.1.1. Atenuación

Las pérdidas de la fibra representa un factor limitador debido a que se reduce la potencia de la señal que se obtiene en el receptor. Como los receptores ópticos necesitan un mínimo de cantidad de potencia para recuperar la señal de manera precisa (sensibilidad del dispositivo), la distancia de transmisión es directamente limitada por las pérdidas de la fibra.

2.1.1.1. Coeficiente de atenuación

Bajo condiciones bastante generales, los cambios en la potencia óptica promedio P de una trama de bits propagándose en el interior de una fibra óptica están dados por la Ley de Beer:

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P$$

en donde α es el coeficiente de atenuación. Si P_{in} es la potencia enviada a la entrada de una fibra de longitud L, la potencia de salida P_{out} esta dada por

$$P_{out} = P_{in} e^{(-\alpha L)}$$

Se acostumbra a expresar α en unidades de dB/km usando la relación

$$\alpha \left[\frac{dB}{km}\right] = -\frac{10}{L}\, log_{10}\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

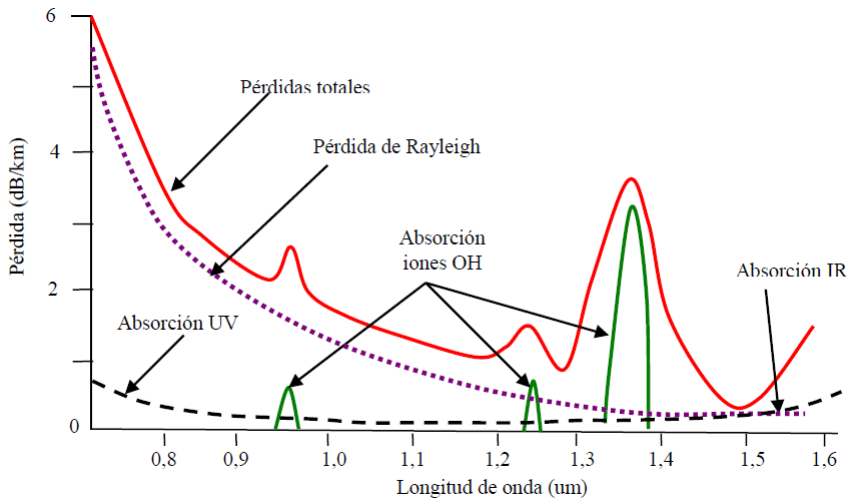


Figura 2.1: Curva de pérdidas de una fibra óptica

2.1.1.2. Absorción del material

Son dos las fuentes principales para que haya absorción de una radiación óptica al paso por la fibra: El *material* base de la fibra y las *impurezas* que pueda contener. Aunque son de distinto origen, ambas pueden ser derivadas de una misma causa y es la estructura atómica y molecular de los componentes. Las impurezas en el material absorben la luz y la convierten en calor.

Los factores que contribuyen a las pérdidas por absorción son: *pérdidas intrínsecas* y *pérdidas extrínsecas*.

Las **pérdidas intrínsecas** se componen de la absorción ultravioleta e infrarroja y son las mínimas que podrían presentarse en una fibra óptica de vidrio.

Todo átomo absorbe energía electromagnética cuando un electrón pasa desde un cierto nivel a otro superior. Cada uno de estos saltos da lugar a absorción de energía y a pérdidas. Si en lugar de átomos aislados se toma un material constituido por un conjunto de ellos en una estructura no cristalina, ahora el equivalente de los niveles atómicos serán bandas de energía entre las que se produce el fenómeno de saltos. La mayor parte de estos saltos tienen lugar a frecuencias dentro del margen **ultravioleta** y su borde inferior (el que linda con el visible).

La ecuación empírica de Urbach, definie las pérdidas por absorción ultravioleta, así:

$$\alpha_{UV} \left[\frac{dB}{km}\right] = C \times e^{E_p/E_0} = C \times e^{h \cdot c/\lambda \cdot E_0}$$

donde α_{UV}: son las pérdidas debidas a la radiación ultravioleta,
C: una constante de magnitud arbitraria,
E_0: valor de la energía de la posición inicial del electrón,
h: la constante de Plank ($6{,}625 \times 10^{-34}$J $\cdot$ s,
c: la velocidad de la luz en el vacío,
λ: la longitud de onda de la luz ultravioleta,

Se puede ver que que la pérdida disminuirá apreciablemente según se incremente λ. Por lo tanto a longitudes por encima de 1000 nm su influencia es casi nula.

Un nuevo fenómeno ocurre cuando se pasa a la región **infrarroja**. Los fotones de luz son absorbidos por los átomos de las moléculas del núcleo de vidrio ($mathrmSiO_2$), produciendo vibraciones mecánicas aleatorias en los enlaces atómicos del material, lo cual conduce a la producción de calor y las consiguientes pérdidas. Su importancia se hace significativa cuando se alcanza la región del infrarrojo.

Una fórmula aproximada para calcular estas pérdidas en el caso del vidrio hecho con GeO_2 SiO_2, es:

$$\alpha_{IR} \left[\frac{dB}{km}\right] = 7,81 \times 10^{11} \times e^{-48,48/\lambda}$$

Las **pérdidas extrínsecas** se presentan debido a la presencia de impurezas en el material. La fuente primaria de las impurezas en el material en fibras de vidrio son los iones de metales de transición en la fabricación (principalmente de hierro, cobalto, cobre y cromo) y los iones OH^- de agua.

Las pérdidas debidas a iones metálicos pueden ser reducidas hasta 1dB/km cuando la mezcla de vidrio se refina por debajo de 0,001ppm.

En el caso de los iones OH, la situación es peor. Concentraciones equivalentes a 0,003 ppm conducen a pérdidas del orden de 20dB/km. Este tipo de absorción no es uniforme en todo el espectro. El principal pico de absorción de OH está cerca de los 2700nm y en los armónicos 2, 3 y 4 (1400 nm, 950 nm y 725 nm).

Los modernos procesos de fabricación han reducido considerablemente el contenido de OH, llegando a ser menos de 0,001 ppm. Las ventanas definidas actualmente han ido desapareciendo, quedando ventanas de baja atenuación en 1310 y 1550 nm. Adicionalmente las fibras fabricadas con SiO_2 , son muy pocas, pasando a ser construidas en materiales tales como GeO_2 , P_2O_5 (Pentóxido de Fósforo) y B_2O_3 (trióxido de Boro).

2.1.1.3. Rayleigh Scattering

Las pérdidas por Rayleigh son un mecanismo fundamental de pérdidas derivadas de las fluctuaciones microscópicas locales de la densidad. Las moléculas de silicio se mueven aleatoriamente en el fundido y el congelado durante la fabricación de la fibra. Fluctuaciones de la densidad conducen a fluctuaciones aleatorias del índice de refracción en una escala menor que la longitud de onda λ. La dispersión de la luz en un medio de este tipo se conoce como *Rayleigh scattering*. La sección transversal de la dispersión varía según λ_{-4}. Como resultado, la pérdida intrínseca de fibras de silicio partir de la dispersión de Rayleigh puede escribirse como

$$\alpha_R = \frac{C}{\lambda^4}$$

donde la constante C esta en el rengo de 0,7-0,9 (dB/km)-μm^4, dependiendo de las componentes del núcleo de la fibra. Estos valores de C corresponden a $\alpha_R = 0,12 - 0,16$ dB/km con $\lambda = 1550\ nm$.

La contribución de la dispersión de Rayleigh puede ser reducida por debajo de 0,01 dB/km para longitudes de onda mayores de 3 µm. Las fibras de silicio no pueden ser usadas en esta región de longitud de onda, debido a que la absorción infrarroja comienza

a dominar las pérdidas de la fibra mas allá de 1,6 µm. Un esfuerzo considerable se ha dirigido a encontrar otros materiales adecuados con baja absorción más allá de 2 µm. Fibras de fluoruro de circonio (ZrF_4) tiene una absorción de material intrínseco de aproximadamente 0,01 dB/km cerca de 2,55 µm y tienen el potencial de presentar pérdidas mucho menores que las fibras de silicio. El estado del arte de las fibras de fluoruro, sin embargo, presentan una pérdida de aproximadamente 1 dB/km debido a pérdidas extrínsecas.

2.1.1.4. Imperfecciones de la guía de onda

Una fibra monomodo ideal con una geometría cilíndrica perfecta guía el modo óptico sin pérdidas de energía en la capa exterior. En la práctica, las imperfecciones de la interfaz núcleo núcleo-revestimiento pueden producir pérdidas adicionales que contribuyen a las pérdidas totales de la fibra. El proceso físico detrás de estas pérdidas es la *dispersión de Mie*, que se producen debido a inhomogeneidades en una escala mayor que la longitud de onda. Generalmente se toman las medidas necesarias para asegurar que el radio del núcleo no varíe significativamente a lo largo de la longitud de la fibra durante la fabricación. Dichas variaciones pueden mantenerse por debajo del 1 %, y la pérdida de dispersión resultante suele ser inferior a 0,03 dB/km.

Las curvaturas en la fibra constituyen otra fuente de pérdidas de dispersión. Normalmente, un haz de luz guiado golpea la interfaz núcleo-revestimiento en un ángulo mayor que el ángulo crítico lo que da lugar a una reflexión interna total. Sin embargo, el ángulo disminuye cerca de una curvatura y puede ser más pequeño que el ángulo crítico para curvaturas cerradas. El haz de luz escaparía de la fibra, lo que se traduce a que una parte de la energía se dispersa en la capa de revestimiento.

Las perdidas por curvatura son proporcionales a e^{-R/R_C}, donde R es el radio de la curvatura de la fibra y $R_C = \dfrac{a}{(n_1^2 - n_2^2)}$. Para fibras monomodo, es típico un valor de $R_C = 0,2 - 0,4$ µm y las perdidas por curvatura son despreciables ($<$ 0,01 dB/km) para radios de curvatura $R > 5$ mm. Dado que la mayoría de las curvaturas macroscópicas superan $R = 5$ mm, las pérdidas por *macrobending* son despreciables en la práctica.

Una fuente importante de pérdidas de fibra, particularmente en la forma del cable, está relacionada con las distorsiones axiales aleatorias que se producen invariablemente durante el cableado cuando la fibra se presiona contra una superficie que no es perfectamente lisa. Dichas pérdidas se denominan pérdidas *microbending* y se han estudiado extensamente. Las microcurvaturas producen un aumento en la pérdida de fibra para las fibras monomodo y multimodo, y pueden dar como resultado pérdidas excesivamente grandes ($\sim$ 100 dB/km) si no se toman las precauciones para minimizarlas.

Existen muchas otras fuentes de pérdida óptica en un cable de fibra. Éstos están relacionados con los empalmes y los conectores usados para el acople de la fibra y se tratan a menudo como parte de las pérdidas en el cable. Las pérdidas por microcurvatura también se pueden incluir en la pérdida total del cable.

2.1.2. Dispersión

La mayor parte de las fibras ópticas son utilizadas para la transmisión de la información a larga distancia. Por tanto, una característica importante de la fibra óptica será tener un gran ancho de banda para la transmisión de la información y tener pocas

pérdidas.

El ancho de banda de la fibra óptica está determinado por el efecto de **dispersión**. La dispersión es el ensanchamiento de la duración de un pulso a medida que viaja a través de una fibra. A medida que el pulso se ensancha, puede ampliarse lo suficiente para interferir con los pulsos vecinos (bits) en la fibra, lo que conduce a la interferencia entre símbolos. La dispersión limita así la separación de bits y la velocidad de transmisión máxima en un canal de fibra óptica.

2.1.2.1. Dispersión Modal

El primer tipo de dispersión de la señal, es la dispersión modal, derivada de los distintos tiempos que necesitan los diferentes modos que se propagan por la fibra, para recorrer cierta distancia sobre la misma y que están contenidos en un mismo pulso de luz.

Intuitivamente los rayos luminosos que entran a la fibra con diferentes ángulos atravesarán caminos diferentes dentro de la fibra. Así por ejemplo en la figura 2.2 el rayo 1, que es un rayo axial, tiene el camino más corto en el interior de la fibra, el rayo 2 atraviesa un camino más largo y el 3 atraviesa un camino todavía más largo.

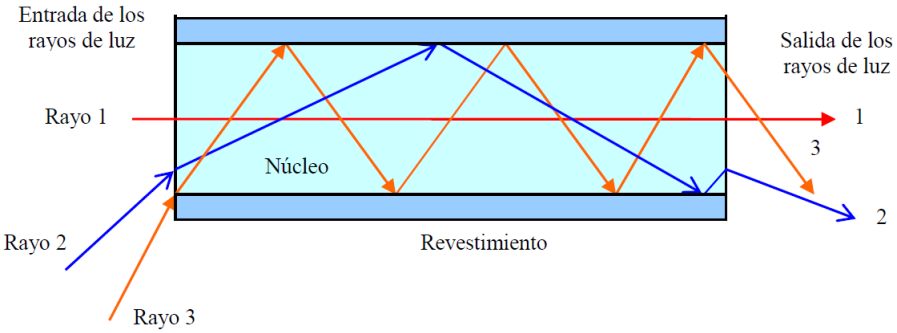


Figura 2.2: Propagación intermodal en una fibra de índice escalonado

Debido a las diferentes longitudes de los caminos, el tiempo del trayecto de cada uno de estos rayos es diferente y estos no llegan al final del cable al mismo tiempo. Como consecuencia, cuando se introduce una excitación del tipo de un pulso estrecho, este pulso energético se ensancha, y a la salida del cable es más ancho que a la entrada. Este efecto limita la rapidez del pulso que la fibra puede llegar a manejar y, por tanto, afecta al ancho de banda de la fibra. La dispersión modal solo se presenta en fibras multimodo, aunque se puede reducir en forma considerable en fibras de índice graduado. Se puede eliminar casi por completo con el uso de fibras monomodo de índice escalonado. [22]

2.1.2.2. Dispersión Cromática

La dispersión cromática en una fibra óptica tiene dos mecanismos: *dispersión debida al material* y *dispersión de la guía de onda*. La **dispersión debida al material** es debida a que tanto el índice de refracción como la velocidad de propagación dependen de la longitud de onda. Cuando rayos de diferente longitud de onda entran a la fibra. Como, diferentes longitudes de onda tendrán diferentes tiempos de propagación, se tiene también una dispersión del pulso. Este tipo de dispersión es importante en fibras multimodo.

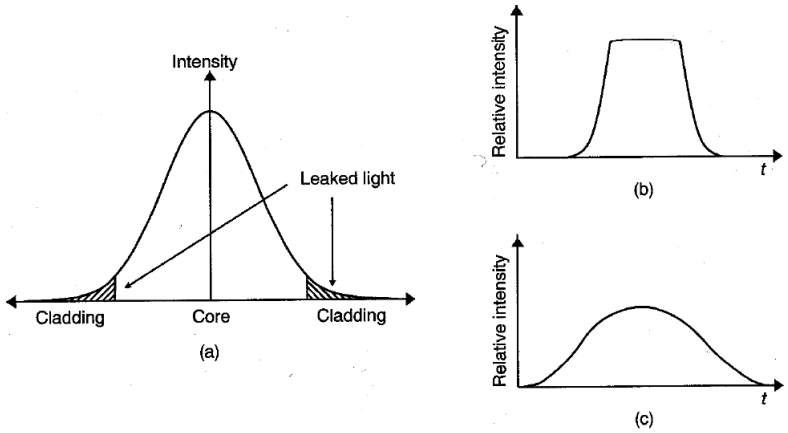


Figura 2.3: (a) Perfil de intensidad del modo m=0 en la fibra. (b) Perfil del pulso de salida si poca luz viaja por el recubrimiento. (c) Perfil del pulso de salida si mucha luz viaja por el recubrimiento.

La **dispersión cromática de la guía de onda**, es bastante más difícil de comprender y para ello vamos a reconsiderar el comportamiento del modo m=0. El perfil de intensidad del modo m=0 en función de la posición a lo largo del diámetro de la fibra se muestra en la figura 2.3 (a). A partir de esta representación observamos que no toda la luz está contenida dentro del núcleo, como hemos asumido en los demás casos: en la práctica parte de la luz "se difunde"hacia el recubrimiento. Esta luz no se pierde, pues esta viaja como parte del modo m=0, pero dado que viaja en un material de índice de refracción menor, viaja más rápidamente que la luz que viaja por el núcleo. En consecuencia, tenemos dispersión. El grado de dispersión dependerá de la proporción de energía luminosa contenida en el recubrimiento: si sólo una pequeña cantidad de luz está presente en el recubrimiento el efecto conjunto sobre el perfil de pulso de salida de esta luz que llega antes que el pulso principal será pequeño (b). Si, sin embargo, es mucha la cantidad de luz que viaja por el recubrimiento esto afectará en gran manera al perfil del pulso de salida, obteniéndose una gran dispersión (c). [22]

2.1.2.3. Dispersión PMD

la dispersión de modos de polarización (PMD), es la que aparece en guías monomodo y se debe a que en realidad los modos transversales que aparecen en una guía monomodo en realidad se descomponen en dos modos lineales que se propagan generalmente de forma ortogonal por el núcleo de la fibra. Estos dos modos transportan la mitad de la energía cada uno y la dispersión aparece alhaber una diferencia entre los índices de refracción de la guía en una dirección (x, por ejemplo) y otra (y, por ejemplo). Es decir si la fibra no tiene un simetría axial perfecta con respecto a su índice de refracción, los dos modos se propagarán a diferente velocidad resultando al final de la guía un pulso luminosos más ancho. [22]

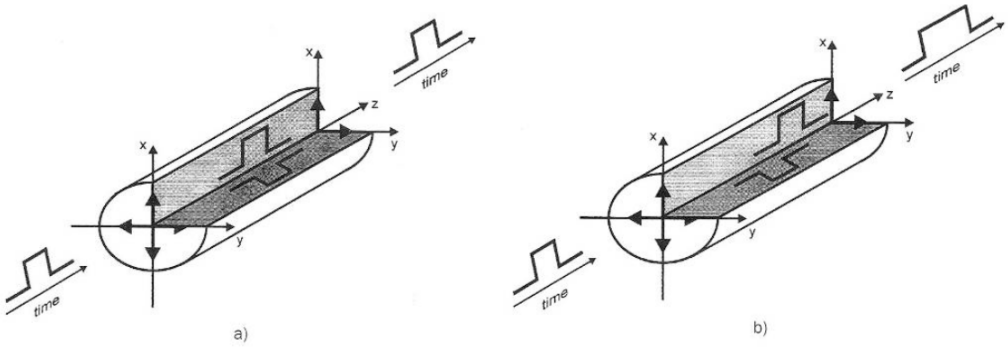


Figura 2.4: (a) Propagación de dos modos transversales ortogonales en una fibra monomodo ideal; (b) propagación de dos modos transversales ortogonales en una fibra monomodo real. Aparece la dispersión de modos de polarización (PMD).

2.1.3. Efectos no lineales

Estos efectos tienen un papel importante en la transmisión de impulsos ópticos a lo largo de fibras ópticas monomodo. Los efectos no lineales se pueden clasificar en tres tipos: los efectos que cambian el índice de refracción del medio guiado debido a la intensidad del pulso, *la modulación de fase inducida*; la dispersión de la onda luminosa a otras ondas ópticas desplazadas en frecuencia cuando la intensidad alcanza un determinado umbral, los fenómenos de *dispersión Brillouin y Raman*; y la mezcla de ondas ópticas para generar una cuarta onda, *la mezcla de cuatro ondas degenerada.* Además de estos efectos no lineales, también existe un efecto fotorrefractivo, que se debe al cambio en el índice de refracción del silicio debido a la intensidad de las ondas ópticas ultravioleta.

2.1.3.1. Modulación de fase inducida SPM

Se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra tiene un componente que depende de la intensidad de la señal; este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Es por esto que las diferentes partes del pulso se ven sometidas a diferentes cambios de fase, lo que da lugar a que se produzca un "chirp" en el pulso, lo que también modificará los efectos de la dispersión cromática. Este efecto es proporcional a la intensidad de la señal de transmisión; es por esto que los efectos del SPM son más pronunciados en los sistemas que utilizan altas potencias de transmisión; el ensanchamiento del pulso generado por SPM, como consecuencia del *efecto Kerr*, está dado por:

$$\Delta\omega = \gamma\, L_{ef}\, \frac{dP(t)}{dt}$$

Donde γ es el parámetro de no linealidad; $P(t)$, la potencia del pulso, y L_{ef}, la longitud efectiva. El parámetro de no linealidad combina el índice de refracción no lineal y el área efectiva en un solo coeficiente, y está dado por

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda L_{ef}} \tag{2.1}$$

Donde n_2 es el índice de refracción no lineal, y λ, la longitud de onda. El índice de refracción no lineal n_2 varía entre valores de $2{,}0 \times 10^{-20}$ m^2/W a $3{,}5 \times 10^{-20}$ m^2/W.

SPM modifica los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto, es importante considerarlo para sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gb/s o más, o sistemas operando a velocidades más bajas, pero con potencias de transmisión elevadas), ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática. Un aspecto positivo de la aparición de la SPM es que el "chirp" que introduce es de signo opuesto al que se genera por la dispersión cromática, por lo que se puede pensar en compensar dicha dispersión a partir de una cierta no linealidad. [28]

2.1.3.2. Modulación de fase cruzada XPM

Se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica, usando la técnica de WDM, debido a que el índice de refracción efectivo, para una onda incidente, no solo depende de la intensidad de esa onda, sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se copropague a través del canal, debido a la interacción entre ellas. Cuando dos o más señales se propagan simultáneamente, el impacto de XPM es similar a SPM. La ecuación **??** muestra el ensanchamiento que sufre el canal se, despreciando la dispersión cromática, donde γ es el coeficiente de no linealidad dado por 2.1, L es la longitud del enlace y $P_1(t)$ y $P_2(t)$ son potencias del canal 1 y 2, respectivamente. [28]

$$\Delta\omega = \gamma\ L\ \frac{dP_1(t)}{dt} + 2\gamma\ L\ \frac{dP_2(t)}{dt} \tag{2.2}$$

2.1.3.3. Dispersión estimulada de Raman SRS

La dispersión estimulada de Raman genera transferencia de energía de los canales de mayor frecuencia a los canales de menor frecuencia; este efecto de observa en la figura 2.5. El coeficiente de ganancia de Raman g_R es el parámetro más importante para describir la dispersión estimulada de Raman. El límite de potencia debido a SRS es el nivel crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales, y está dado por la siguiente ecuación:

$$P_{Limite}(SRS) \approx \frac{16\ A_{ef}}{g_R\ L_{ef}}$$

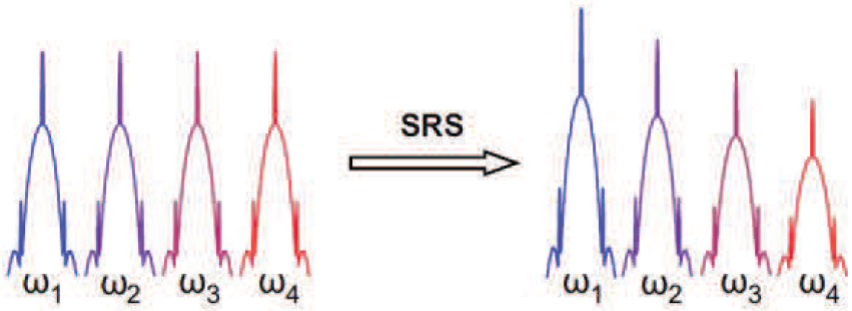


Figura 2.5: Principio de la Dispersión Estimulada de Raman

2.1.3.4. Dispersión estimulada de Brillouin SBS

La dispersión estimulada de Brillouin puede ocurrir a menores niveles de potencia de entrada que los necesarios para que se presente la dispersión estimulada de Raman. Ese efecto no lineal, al igual que la SRS, se presenta por la generación de una onda llamada onda de Stokes, que se propaga en dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda incidente y tiene una frecuencia menor a la de la luz incidente. Debido a la SBS se presenta un cambio en frecuencia de la onda de Stokes de 11 GHz, aproximadamente, el cual es más pequeño por tres órdenes de magnitud, comparado con el cambio en frecuencia que genera SRS, que es, aproximadamente, 13 THz [28].

Un importante parámetro de este efecto no lineal es la potencia límite debida a SBS, la cual se define como el nivel de potencia crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales; el valor de la potencia límite puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$P_{Limite}(SBS) \approx \frac{21\ A_{ef}}{g_B\ L_{ef}}$$

Donde g_B es la ganancia de Brillouin.

El valor de la potencia límite debido a SBS limita la potencia incidente por canal en un sistema WDM y es independiente del número de canales que se esté empleando. La figura 2.6 muestra una señal a una longitud de onda $\lambda = 1550$nm, y la onda dispersada que se genera debido a SBS. El espectro de ganancia de la onda dispersada tiene un ancho de 20 MHz.

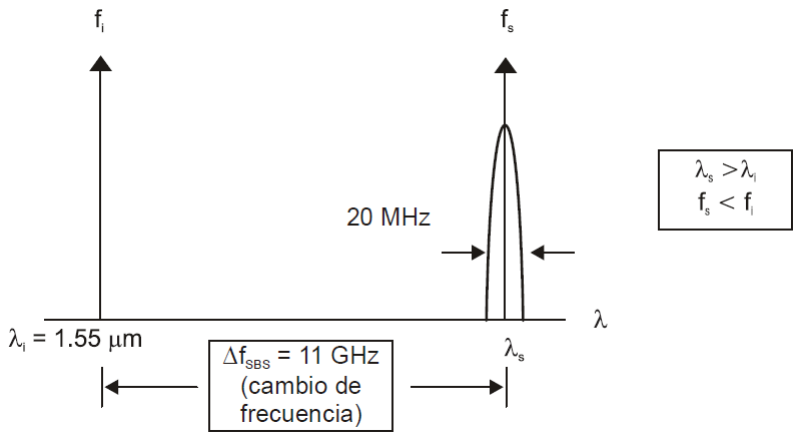


Figura 2.6: Señal a una longitud de onda $\lambda = 1550$nm, y onda dispersada que se genera debido a SBS

2.1.3.5. Mezcla de Cuarta Onda FWM

Cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes (diferentes CanalesWDM) se propagan en una fibra, se puede dar una mezcla de señales que puede generar nuevos componentes de interferencia de la señal óptica; esto debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de la señal, lo que causa un medio no lineal de propagación y crea las condiciones para la mezcla de la señal. Para que el fenómeno de FWM ocurra es necesaria la condición de *phase-matching*, donde

el efecto de la FWM depende de la potencia de la señal, dispersión y del espaciamiento de los canales WDM. La figura 2.7 muestra el efecto de FWM para tres canales de comunicación [28].

A medida que se incrementa el número de canales en un sistema WDM, las componentes ópticas generadas por FWM se incrementan de forma casi exponencial.

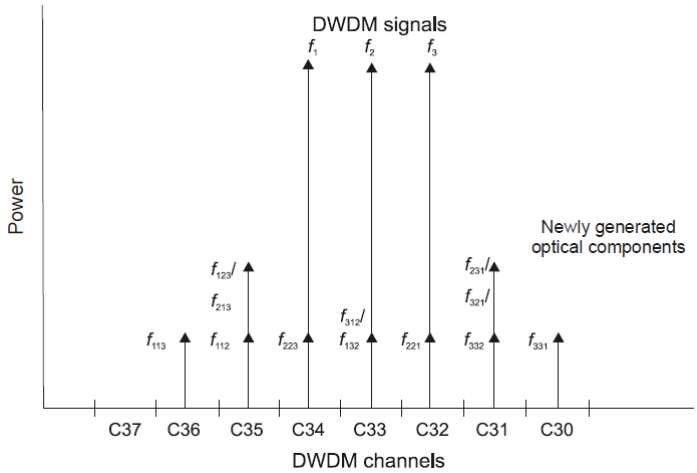


Figura 2.7: Efecto de FWM en tres señales equidistantes

2.2. Fuentes ópticas

Una importante componente del procesado óptico de la información es la generación de señales ópticas. Las señales ópticas se utilizan en comunicaciones donde los resultados que se obtienen al utilizar fibras ópticas para la transmisión de la información son mucho mejores que los obtenidos mediante la utilización de cables metálicos. Las señales ópticas son necesarias para la proyección de la información en dispositivos visualizadores. Los haces ópticos son necesarios también en sistemas de memoria basados en lectura óptica [19]

Una fuente óptica debe tener como mínimo las siguientes características, cuyo fin es optimizar la potencia lumínica que se entrega a la fibra óptica y permitir que la energía se propague a través de ella sin distorsiones en el receptor:

- Mínima anchura espectral ($\Delta\lambda$)
- Máxima coherencia espacial
- Potencia óptica suficiente

(a) La anchura espectral: Está relacionada directamente con la dispersión cromática, ya que la potencia entregada por la fuente luminosa no es emitida en una sola longitud de onda, sino que está distribuida en distintas longitudes alrededor de la longitud de onda central. La anchura espectral ($\Delta\lambda$), se define como la diferencia relativa en manómetros (nm) entre los puntos donde la potencia emitida se reduce en el 50 % con relación a la máxima. [23]

(b) La alta coherencia espacial de la fuente luminosa: Está determinada por su patrón de radiación (configuración de la forma de propagación de la onda

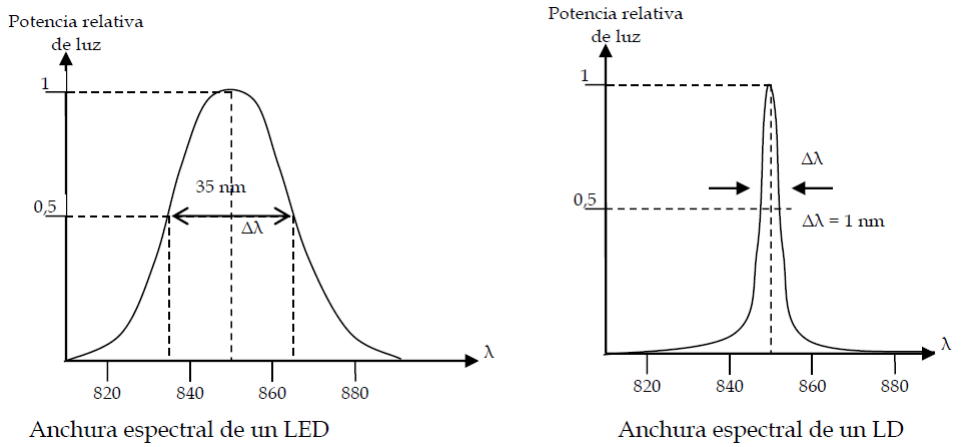


Figura 2.8: Anchura espectral de un LED y láser

luminosa en el espacio libre). Mientras más direccional sea el patrón, más fácil será que la potencia emitida quede dentro del cono de aceptación de la fibra, y por tanto habrá una alta eficiencia de acoplamiento entre la fuente luminosa y el núcleo de la fibra.

El patrón de radiación está relacionado con el ángulo sólido del haz que forma el rayo de luz al propagarse (Ω_A) y que está subtendido por los dos ángulos de los patrones planos principales a media potencia (HPBW), denominados para este caso α y β, y que está representado por:

$$\Omega_A = \alpha_{HP} \times \beta_{HP} \quad [\mathrm{gr}^2]$$

También, la directividad está asociada con el ángulo sólido del haz, la cual indica la concentración de potencia de luz dentro del ángulo sólido. Está dada por:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad [Adimensional]$$
$$4\pi \text{ Sr} = 41253 \text{ gr}^2$$

(c) La potencia o intensidad luminosa: Este parámetro se puede expresar en términos fotométricos o radiométricos.

La fotometría mide las ondas luminosas visibles al ojo humano y entonces la potencia de la luz se describe como la densidad de flujo luminoso, cuya unidad es lúmenes por metro cuadrado.

La radiometría mide la luz en todo el espectro electromagnético y por lo tanto la potencia óptica mide la tasa con la que las ondas electromagnéticas transfieren energía luminosa, es decir, es el flujo de energía luminosa que atraviesa determinado punto en un tiempo dado.

De acuerdo con lo anterior, la potencia óptica se define mediante:

$$\begin{aligned} Potencia &= \frac{dE}{dt} \\ P &= \frac{dQ}{dt}[W] \end{aligned}$$

en donde:

E= Energía
P= Potencia óptica [W]
dQ=Carga instantanea [Joule]
dt=Cambio instantaneo de tiempo [s]

A veces a la potencia óptica se le denomina *flujo radiante* (Φ), que equivale a julios/segundo y es la misma potencia que se mide eléctrica o térmicamente en vatios. Los términos radiométricos se usan en general con fuentes luminosas cuyas potencias van de decenas de microvatios hasta más de 100 milivatios. La potencia óptica se suele expresar en decibelios relativos a un valor definió de potencia, como 1 mW (dBm) o 1 μW (dBμ). Las ecuaciones correspondientes son:

$$\text{dBm} = 10\ log\ \frac{P\ [W]}{0{,}001\ [W]}$$
$$\text{dB}\mu = 10\ log\ \frac{P\ [W]}{0{,}000001\ [W]}$$

El principio básico en el que se basan estos dispositivos para emitir radiación infrarroja radica en que en algunos materiales, como semiconductores, podemos distinguir dos bandas de energía: la *banda de valencia* (menor energía E_1) y la *banda de conducción* (mayor energía E_2), las cuales están separadas por un espacio donde no existen niveles de energía. Esto quiere decir que los electrones existentes en el material pueden existir solo en la banda de valencia o en la banda de conducción pero no entre éstas.

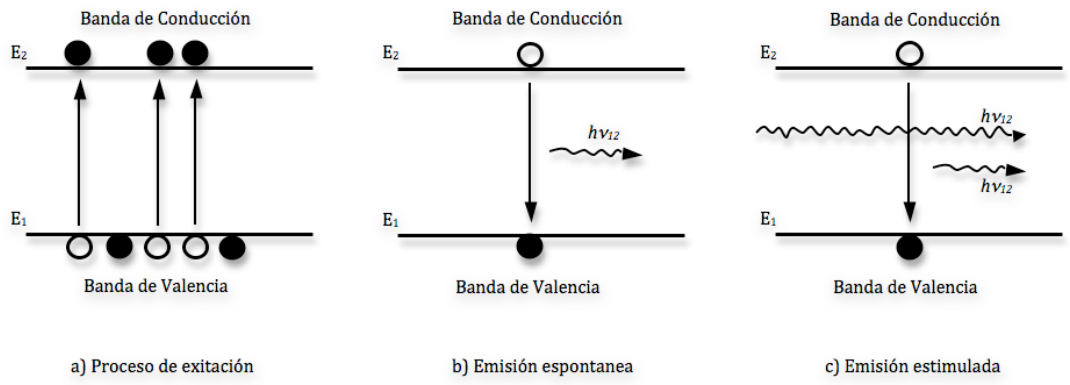


Figura 2.9: Procesos fundamentales que ocurren entre los dos niveles de energía de un átomo

Cuando no existe un campo eléctrico externo aplicado al semiconductor, todos los electrones se encuentran en la banda de valencia, ya que estos no poseen la suficiente

energía extra para saltar hacia la banda de conducción. Pero cuando un campo eléctrico externo es aplicado, algunos de estos electrones adquieren la energía necesaria para subir a la banda de conducción (Figura 2.9.a). Se dice así que estos electrones se encuentran "excitados", dejando huecos (cargas positivas) en la banda de valencia [24].

Cuando un electrón que se encuentra en la banda de conducción cae (pierde energía) hacia la banda de valencia, esa energía perdida se emite en forma de un fotón. Esta recombinación entre electrones y huecos se puede dar de manera espontánea o estimulada.

La **emisión espontánea** significa que la radiación ocurre sin una causa externa. Es decir, electrones excitados en la banda de conducción caen sin inducción externa a la capa de valencia, lo que resulta en emisión espontánea de un fotón con energía $E = hv_{12}$, como se observa en la Figura 2.9.b. Sin embargo, si se deja que uno de estos fotones choque con un electrón excitado, ocasionará que este último caiga a la banda de valencia, generando otro fotón de las mismas características (energía, frecuencia, dirección, fase) de aquel que lo produjo. A este proceso se le llama **emisión estimulada** (Figura 2.9.c)

2.2.1. Diodo LED

El LED es un dispositivo sencillo de manipular y económico, que se adapta bien a enlaces de Comunicaciones Ópticas de poco alcance y moderado ancho de banda. Tienen habitualmente un diagrama de radiación lambertiano (coseno), es decir, bastante abierto, por lo que se adaptan mejor a fibras ópticas con apertura numérica alta, como las fibras multimodo. Es común utilizar LEDs asociados a fibras multimodo de índice gradual en redes de área local.

Los LED emiten luz incoherente, a diferencia de los LD. Funcionan por emisión espontánea. Desde el punto de vista eléctrico, un LED es un diodo que se polariza en directa, y necesita para su funcionamiento una fuente de corriente. La respuesta óptica del LED es (razonablemente) lineal con la corriente que lo atraviesa, hasta llegar a saturación. Los LED de primera ventana (850 nm) suelen fabricarse de GaAs y AlGaAs. Los de segunda y tercera ventana utilizan InGaAsP e InP.

Existe varios tipos básicos de LED para sistemas de comunicaciones ópticas por fibra: el LED a partir de una heterounión, el de emisión por borde o lateral (ELED), el LED de emisión superficial (SLED) y el diodo superluminiscente (SLD) o superradiante. Sus características electroópticas y dinámicas son diferentes, por lo que resultan apropiados en distintas aplicaciones. Así, en distancias cortas (0-3 km), con tasas binarias bajas, se usan SLEDs y ELEDs. Un SLED típico puede funcionar eficientemente hasta 250 Mbps. Van invariablemente asociados a fibras ópticas multimodo, puesto que su diagrama de radiación suele ser bastante abierto (lambertiano).

Para distancias mayores y/o tasas binarias más altas, se prefieren los ELED. Éstos pueden modularse a tasas superiores a 400 Mbps, y se asocian tanto a fibras monomodo como multimodo. A distancias y tasas aún mayores se usan los ELED y los SLD. Los SLD son ELEDs diseñados para operar en modo superluminiciscente, por amplificación de emisión espontánea (ASE), tal como se comenta posteriormente [25].

2.2.1.1. LED a partir de heterounión

Si el LED se fabrica de un solo semiconductor, existen algunos problemas que reducen la eficiencia del dispositivo. El primer problema es que en un LED homounión (es decir, un dispositivo basado en un único semiconductor), el volumen de emisión de fotones debe estar cerca de la superficie de manera que los fotones emitidos no sean reabsorbidos. Como cerca de la superficie estamos en la interfase, la calidad del semiconductor normalmente no es muy buena por lo que existirán muchos defectos que producen recombinaciones no radiantes.

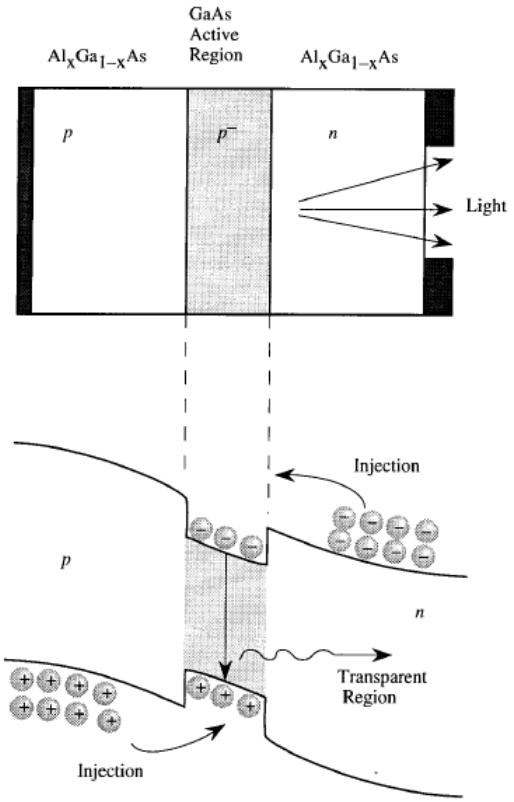


Figura 2.10: LED de heterounión: utiliza un semiconductor de GAP estrecho para la región activa. Los fotones emitidos no se absorben por las capas superior o inferior que son transparentes para la radiación emitida

El LED de heterounión resuelve este problema inyectando cargas desde un material de mayor anchura de la banda prohibida en una región activa de material de menor anchura de la banda prohibida. Los electrones y huecos son inyectados desde regiones de tipo n y p de mayor anchura de la banda prohibida en la zona activa p^- de menor anchura de la banda prohibida donde quedan enclavados. Los electrones no pueden entrar en la región de tipo p de ancha banda prohibida por debajo de la zona activa y, por tanto, no sufren de las pobres condiciones superficiales (interfase). Además, los fotones emitidos no son absorbidos en las regiones superior o inferior pues la energía del fotón es menor que la anchuras de la banda prohibida de las regiones n o p.

La región activa suele tener un grosor de 0,1µm a 0,2µm y los materiales más usados son GaAs/AlGaAs sobre substrato de GaAs y InGaAsP/InP y InGaAs/InGaAsP sobre substrato de InP [20].

2.2.1.2. LED de emisión lateral

Es de suma importancia el acoplar una señal luminosa a una fibra óptica. Igualmente es necesario un haz altamente colimado para un acoplamiento eficiente. Para conseguirlo se utiliza una heteroestructura que transmite por su lado o borde (LED de emisión lateral), como se muestra en la figura 2.11. La estructura se asemeja a la del diodo láser sólo que en el láser se debe diseñar de forma que se obtenga una cavidad óptica de alta calidad que produzca realimentación óptica.

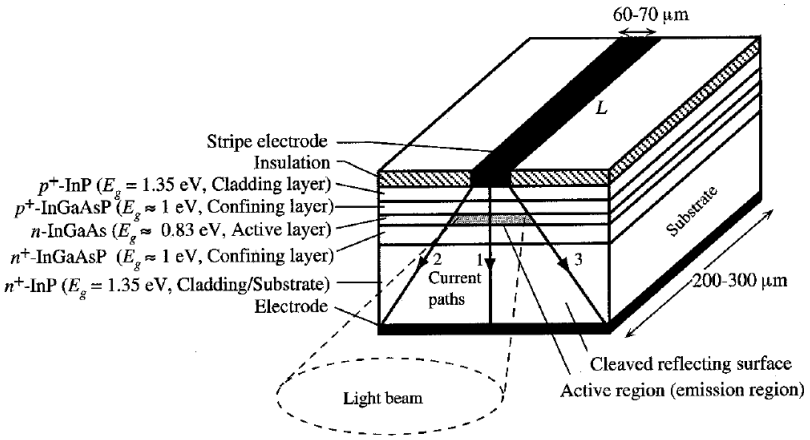


Figura 2.11: Esquema de un LED de emisión lateral. Las capas de confinamiento provocan que la luz salga al exterior por el borde del LED

En este tipo de LED se añaden capas (recubrimientos) de materiales de gran anchura de la banda prohibida lo cual no únicamente confina a electrones y huecos a la capa activa, sino que también provoca que los fotones emitidos viajen a lo largo del eje del LED y emerjan por el borde del componente. Una variación escalón en el gap energético provoca una variación escalón de la constante dieléctrica y del índice de refracción de forma que, si estos son los adecuados, la onda óptica queda confinada en la zona activa (de forma similar a lo que sucedía en el caso de las guías de onda). La parte posterior de la zona activa es reflectante y así también evita la pérdida de fotones por ella.

Debido a la alta colimación del haz (30º de anchura en la perpendicular a la capa activa y 120º en la paralela a la capa activa) se mejora en gran medida la eficiencia del acoplamiento de su luz a fibras ópticas [20].

2.2.1.3. LED de emisión superficial

Un tipo importante de LED es el de emisión superficial desarrollado por primera vez por Burrus y Dawson en 1970 y cuyo esquema se muestra en la figura . Al final del LED se acopla una fibra óptica practicando un orificio en el LED y adhiriéndola mediante la utilización de resina. El LED en sí es una heteroestructura con una fina región activa de bajo valor de anchura de la banda prohibida rodeada de regiones de ancha banda prohibida.

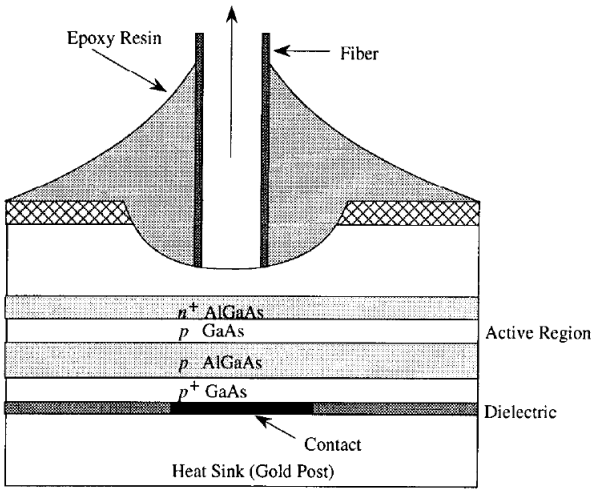


Figura 2.12: Esquema de un LED de emisión superficial. El LED tiene una fibra pegada a su superficie.

Los fotones emitidos son directamente acoplados a la fibra óptica. En estructuras más avanzadas, se sitúa sobre el LED una microlente para mejorar la eficiencia del acoplamiento [20].

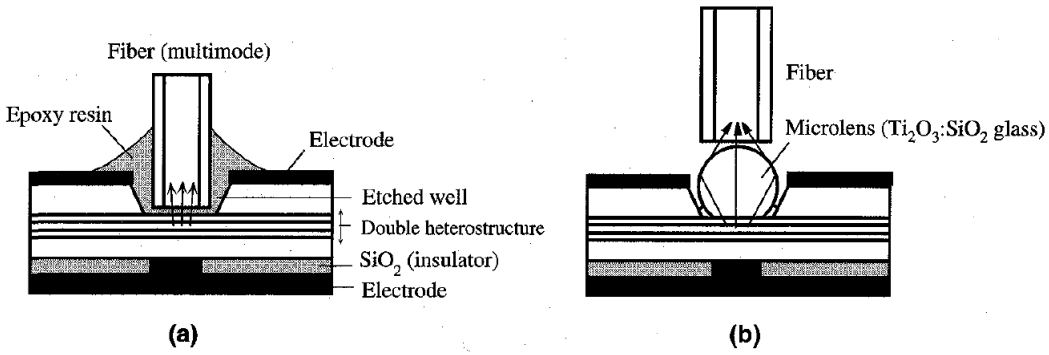


Figura 2.13: (a) La luz es acoplada desde la superficie emisora del LED a la fibra multimodo mediante el uso de un material (resina) con índice de refracción adecuado. (b) Una microlente focaliza la luz divergente emergente desde la superficie del LED hacia la fibra óptica multimodo.

2.2.1.4. LED superradiante

Los LEDs superradiantes o superluminiscentes (SLD) son ELED que funcionan a un alto régimen de inyección de corriente. El fenómeno de la superluminiscencia (obtención de más de un fotón en promedio por cada recombinación espontánea) aparece cuando los fotones producidos por emisión espontánea experimentan ganancia por emisión estimulada debida a la alta concentración de pares $e^- - h^+$ existentes en cada momento. La salida de un SLD procede de esta amplificación de la emisión espontánea (ASE) y como consecuencia es parcialmente coherente.

Los SLD son dispositivos intermedios entre los LED convencionales y los láseres. Presentan una anchura espectral menor que los primeros y mayor que los segundos. Su

geometría se aproxima a los LDs, pero carecen de un mecanismo eficiente de realimentación óptica necesario para conseguir alta coherencia (llevan una capa antirreflexiva para eliminar la cavidad Fabry-Perot).

Cuando se ataca un SLD con baja intensidad, su funcionamiento es semejante al de un ELED. A medida que se incrementa el nivel de corriente, comienza a actuar el fenómeno de la superluminiscencia, y la potencia óptica aumenta de forma no lineal a la vez que se reduce la anchura espectral.

Las ventajas principales de los SLD son su mayor potencia acoplada, mayor ancho de banda y menor anchura espectral. Por el contrario, la respuesta no lineal corriente-potencia óptica supone una desventaja, además de su alta sensibilidad a la temperatura, menor fiabilidad y alto precio [25].

2.2.2. Diodo Láser

Al igual que en el LED en el LD generamos fotones a partir de la recombinación de pares electrón-hueco, pero en el LD tendremos una cavidad óptica que guía los fotones generados. La cavidad óptica es básicamente una cavidad resonante en la cual los fotones sufren múltiples reflexiones. Por tanto, cuando los fotones son emitidos sólo se permite que una pequeña fracción de éstos deje la cavidad. En consecuencia, la concentración de fotones dentro de la cavidad empieza a crecer. Existen muchas cavidades para su utilización en diodos láser, siendo las más importantes la cavidad de Fabry-Perot, cavidades con realimentación distribuida con enrejados periódicos ("grating") y cavidades de láseres de emisión superficial con reflectores diseñados especialmente para ellas. La cavidad más utilizada es la de Fabry-Perot cuyo elemento más importante es una superficie pulida que hace de espejo reflejando los fotones generando modos resonantes. Estos modos resonantes son los que satisfacen la expresión,

$$L = \frac{q\lambda}{2}$$

donde q es un entero, L es la longitud de la cavidad y λ es la longitud de onda del fotón en el material. Su relación con la longitud de onda en el vacío es

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_r}$$

donde n_r es en índice de refracción de la cavidad. El espaciado entre los modos estacionarios es

$$\Delta k = \frac{\pi}{L}$$

Como puede observarse en la figura 2.14.a sólo se pulen dos caras opuestas de la cavidad (dos superficies que hacen de espejo). Las otras dos se dejan sin pulir de forma que los fotones emitidos no son reflejados en estas caras, es decir, no se generan modos resonantes por lo que no está permitido el crecimiento de la concentración de fotones en esa dirección. En la dirección en la que sí existen las caras pulidas es en donde se generan los modos resonantes que provocan el proceso de emisión estimulada.

Únicamente las ondas estacionarias sobreviven dentro de la cavidad. Estas ondas estacionarias se producen cuando una onda se superpone con su reflejada. Dichas ondas estacionarias están formadas por aquellas longitudes de onda que garantizan que la amplitud del campo eléctrico es cero en cada espejo [20].

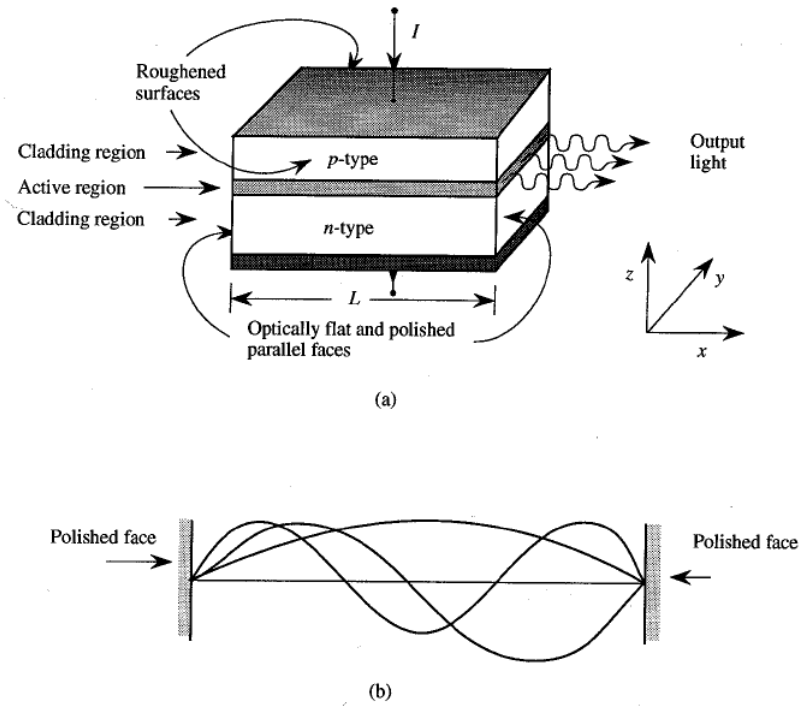


Figura 2.14: (a) Estructura láser típica donde se ven los espejos y la cavidad utilizada para confinar los fotones. (b) Estados estacionarios de la cavidad. Los espejos son los responsables de estos estados.

2.2.2.1. Láser Fabry-Perot

La estructura de la cavidad de Fabry-Perot tiene una longitud L y una anchura d_T. En esta cavidad hay un número de modos ópticos que forman modos estacionarios como ya hemos visto. Cuando se inyectan portadores en el láser llega un momento en que la ganancia se hace positiva y se superan las pérdidas. En ese instante un número determinado de los modos ópticos longitudinales comenzará la emisión estimulada. Los vectores E y H de estos modos longitudinales son perpendiculares a la dirección de propagación. Si se inyectan todavía más portadores, algunos modos cuyas frecuencias están más cercanas al pico de energía se hacen más potentes. Aún así siempre hay más de un modo que es emitido por el láser. Debido a esto la pureza modal de la cavidad de Fabry-Perot no es muy buena. El espaciado entre los modos en la cavidad de Fabry-Perot es

$$\Delta k = \frac{\pi}{L}; \quad \Delta\omega = \frac{v\pi}{L}$$

donde v es la velocidad de la luz. Es decir que los distintos modos longitudinales tendrpan frecuencias de:

$$v = \frac{m \cdot v}{2 \cdot L} = m \cdot \frac{c}{2 \cdot n_r \cdot L} \qquad m = 1, 2, 3...$$

con separación entre modos:

$$\Delta v = \frac{v}{2 \cdot L} = \frac{c}{2 \cdot n_r \cdot L}$$

Los modos de fotones que se pueden emitir en la recombinación de pares electrón-hueco en una cavidad de Fabry-Perot son esencialmente los mismos que en un semiconductor

normal. Esto es debido al tamaño tan grande de la cavidad comparado con la longitud de onda de la luz.

La cavidad de Fabry-Perot es una de las estructuras más sencillas utilizadas en láseres de semiconductores. Las longitudes típicas van desde los 150µm a 1mm dependiendo de la aplicación [20].

Cavidades guiadas por ganancia

La técnica más común para confinar la onda óptica y dirigirla a lo largo de la cavidad es fabricar láseres con geometría de tiras. La estructura del semiconductor es recubierta de una fina capa de óxido (SiO_2) en la cual se produce por atacado una fina tira de anchura d_T entre 2µm y 10µm. El contacto se realiza a través de esta tira como se muestra en la siguiente figura. Esto permite que la corriente inyectada, y por tanto la onda óptica, quede confinada en dicha región tan estrecha. Un efecto similar se consigue con el láser de perfil rectangular mostrado en 2.15.b

La corriente se inyecta a través de la estrecha apertura de anchura d_T y se esparce por debajo de ella debido al carácter difusivo del flujo de corriente. Esta difusión se puede controlar a través del diseño del dispositivo. La concentración de portadores debajo de la tira no es uniforme. Como el índice de refracción del material depende de dicha concentración de portadores, también se distribuye de forma no uniforme. Finalmente, la ganancia del dispositivo tampoco es uniforme.

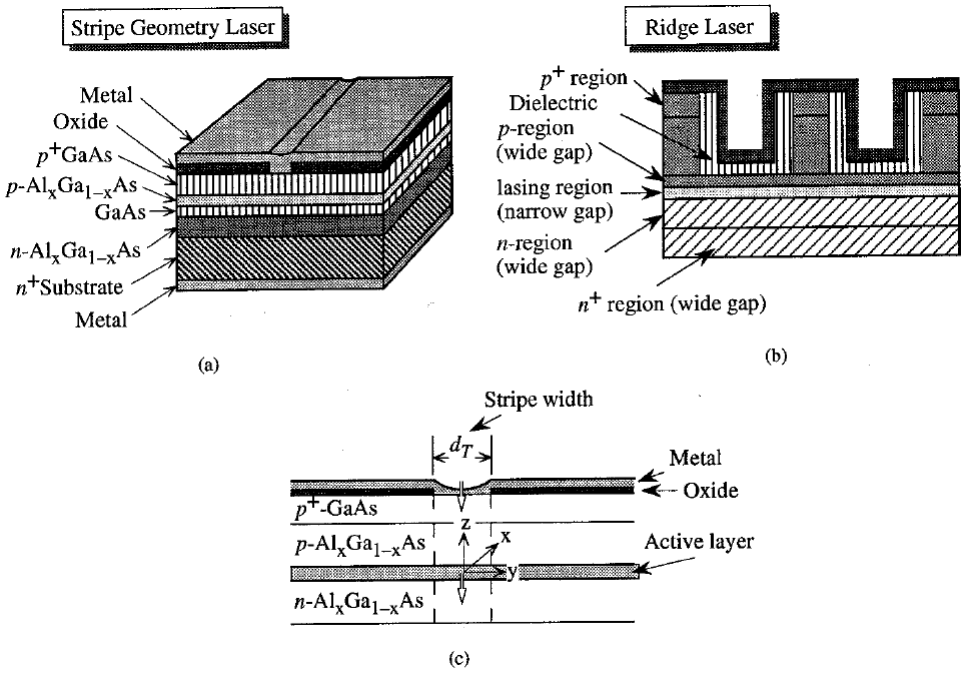


Figura 2.15: (a) Láser de geometría de tiras, (b) el láser de perfil rectangular, (c) inyección de corriente en el láser

En consecuencia, no solo la parte real del índice de refracción es no uniforme en la dirección sino que también la ganancia es altamente no uniforme. De hecho el salto en el valor del índice de refracción es bastante pequeño como para que pueda ser considerado determinante en el comportamiento transversal mientras el perfil de ganancia en y es altamente no uniforme. Debido a esto, es la ganancia la que produce el efecto de

guiado. Como es la circulación de la corriente, la causante de la ganancia en la región activa a este tipo de diodos láser se les llama guiados por ganancia.

Es difícil producir un funcionamiento en que se tenga un único modo transversal en un láser de este tipo en que es la ganancia la que determina el efecto de guiado a menos que se tenga una tira muy estrecha (∼2μm). Pero para estas tiras tan estrechas, la corriente umbral del dispositivo se hace muy alta ya que una gran parte de esta corriente se esparce y no se aprovecha. Por ello se utilizan cavidades guiadas por índice para láseres de un solo modo transversal [20].

Cavidades guiadas por índice

Las cavidades guiadas por índice se basan en una variación escalón del índice de refracción en dirección lateral. Dicha estructura es llamada diodo láser "enterrado" de heteroestructura y su fabricación es mucho más compleja. Para producir este salto en el índice de refracción, se requieren procesos de crecimiento y atacado a fin de obtener regiones de pocas micras. En este tipo de cavidad la zona activa queda rodeada de materiales de mayor anchura de la banda prohibida.

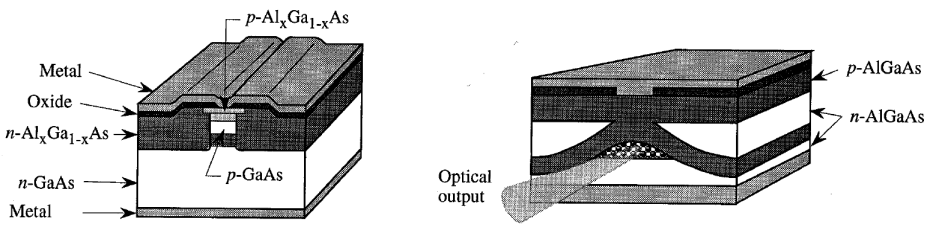


Figura 2.16: Cavidades láseres guiadas por índice

Si este tipo de láser se fabrica correctamente, no sufre de "codo" en su curva de potencia frente a la corriente inyectada. Su salida es monomodal y su corriente umbral muy baja. Por supuesto, para obtener los máximos beneficios de esta estructura, debemos tener pozos cuánticos en la región activa [20].

2.2.2.2. Láser DFB

La cavidad láser de Fabry-Perot, aunque es fácil de fabricar tiene una serie de inconvenientes que hay que evitar. Dado que se utilizan dos espejos no se selecciona ningún modo en particular en la cavidad y el modo emergente y dominante dependerán del espectro de la ganancia que depende de las propiedades electrónicas de la región activa. Como la distancia entre modos es de sólo 4Å[1] o 5Å y el espectro de ganancia es bastante plano en dicho rango, tendremos varios modos emergiendo de la cavidad de Fabry-Perot. A altas potencias los modos laterales serán menores en relación con el modo dominante, pero aun así la anchura del espectro es de unos 20Å aunque cada modo es muy estrecho. La pregunta es: ¿se puede con la misma cavidad seleccionar un modo? Después de todo, en circuitos electrónicos es posible diseñar cavidades resonantes con gran selectividad en lo que respecta a los modos. De hecho en microondas sí que se tiene la capacidad de crear cavidades resonantes altamente selectivas. Aunque en componentes fotónicos, no es tan sencilla la obtención de cavidades tan sumamente selectivas,se pueden encontrar algunas soluciones.

[1] 1Å=0.1nm

Una cavidad selectiva respecto a los modos es la estructura de realimentación distribuida (DFB) que se basa en la propagación de ondas en estructuras periódicas [20].

En la estructura DFB se incorpora un enrejado periódico en la estructura del láser en las proximidades de la región activa. Como vamos a ver este enrejado, llamado enrejado de Bragg actúa como un espejo, reflejando de forma selectiva según la longitud de onda. Este tipo de enrejado está compuesto por una especie de "arrugas" con una periodicidad Λ. De forma intuitiva se puede obtener que las reflexiones parciales de las ondas provenientes de las arrugas interferirán constructivamente (se reforzarán la una a la otra) para dar una única onda reflejada sólo en el caso de que la longitud de onda corresponda a dos veces la periodicidad del enrejado. Por ejemplo en el esquema simplificado de la siguiente figura, las ondas parcialmente reflejadas A y B tienen una diferencia de camino óptico de valor $2 \cdot \Lambda$. Interferirán constructivamente únicamente si $2 \cdot \Lambda$ es un múltiplo de la longitud de onda en el medio:

$$q \cdot \frac{\lambda_B}{n} = 2 \cdot \Lambda \quad q = 1, 2, ...$$

donde n es el índice de refracción del material enrejado.

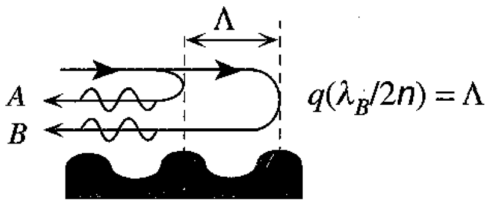


Figura 2.17: Las ondas parcialmente reflejadas en las arrugas interferirán constructivamente constituyendo una onda reflejada cuando la longitud de onda satisfaga la condición de Bragg

Una expresión más aproximada para las longitudes de onda de Bragg la podemos obtener a partir de la condición:

$$\lambda_B = \frac{2 \cdot \Lambda \cdot n_{eff}}{q} \quad q = 1, 2, ...$$

donde $n_{eff} = n \cdot sen\theta$. Todas las magnitudes, incluido el ángulo θ están ilustradas en la figura 2.18.

2.2.2.3. Láser SEL

El láser de emisión lateral es pues un dispositivo físicamente bastante grande comparado con otros dispositivos microelectrónicos como por ejemplo transistores. Además es difícil de conseguir un gran número de láseres integrados en un solo chip lo que es una limitación para los chips de ordenador con interconexión óptica.

Los **láseres de emisión superficial** (SEL) o láseres de emisión superficial con cavidad vertical (VCSEL) resuelven estos problemas. Se pueden producir en gran número sobre una oblea y el rayo emerge perpendicularmente a la oblea. Los dispositivos se pueden hacer también muy pequeños de forma que la corriente umbral es del orden de microamperios.

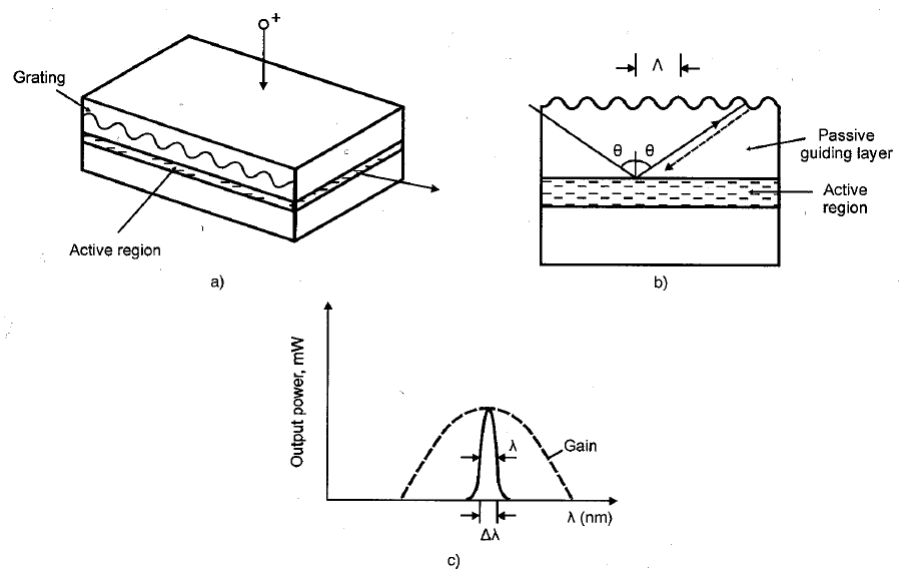


Figura 2.18: Diodo láser de realimentación distribuida (DFB) (a) Un diodo láser DFB. (b) Como trabaja la realimentación distribuida. (c) Espectro de la radiación de salida

En el SEL los espejos están en la parte superior e inferior del dispositivo. El grosor de la cavidad no puede exceder los 10μm. Si la reflectividad se mantiene alrededor de 0.3, las pérdidas por reflexión serán del orden de $10^3 cm^{-1}$ o mayores. Esto significa una corriente umbral muy elevada. Para evitarlo se utilizan espejos de alta reflectividad. Si la reflectividad de los espejos se puede hacer del orden de 0.99, las pérdidas serán sólo de $10cm^{-1}$ lo que es muy aceptable para láseres de baja corriente umbral.

En un SEL la región activa es como la de una cavidad de Fabry-Perot pero varía el recubrimiento.Una estructura periódica puede utilizarse para reflejar efectivamente una onda acorde con la periodicidad espacial. Este concepto de reflectores distribuidos de Bragg (DBR's) se utiliza en el SEL para obtener espejos de alta calidad. Los reflectores son espejos dieléctricos realizados alternando finas capas de alto u bajo índice de refracción. Estos espejos dieléctricos proporcionan un alto grado de reflectividad a la longitud de onda λ_0 en el espacio libre siempre y cuando los grosores de las capas que se alternan d_1 y d_2 con índices de refracción n_{r1} y n_{r2} cumplan la condición

$$n_{r1} \cdot d_1 + n_{r2} \cdot d_2 = \frac{\lambda_0}{2}$$

La longitud de onda se elige de forma que coincida con la energía de los fotones del pico de ganancia. La reflectividad de la estructura DBR es muy alta cuando se cumple la condición de Bragg ($\lambda = \lambda_0$) y cae bruscamente para otras longitudes de onda.

Se pueden construir matrices de láseres a partir del SEL pudiéndose alcanzar potencias de hasta 1W. Aún así existen algunos problemas con esta estructura comparada con las de emisión lateral.

El SEL adquiere importancia por su capacidad de formar parte de un chip no sólo para ser incluido en circuitos integrados si no también para fabricar láseres de potencia (1W). Las limitaciones físicas de la construcción de semiconductores hacen que no se puedan obtener potencias superiores a los 10mW para un solo láser. Aunque la potencia

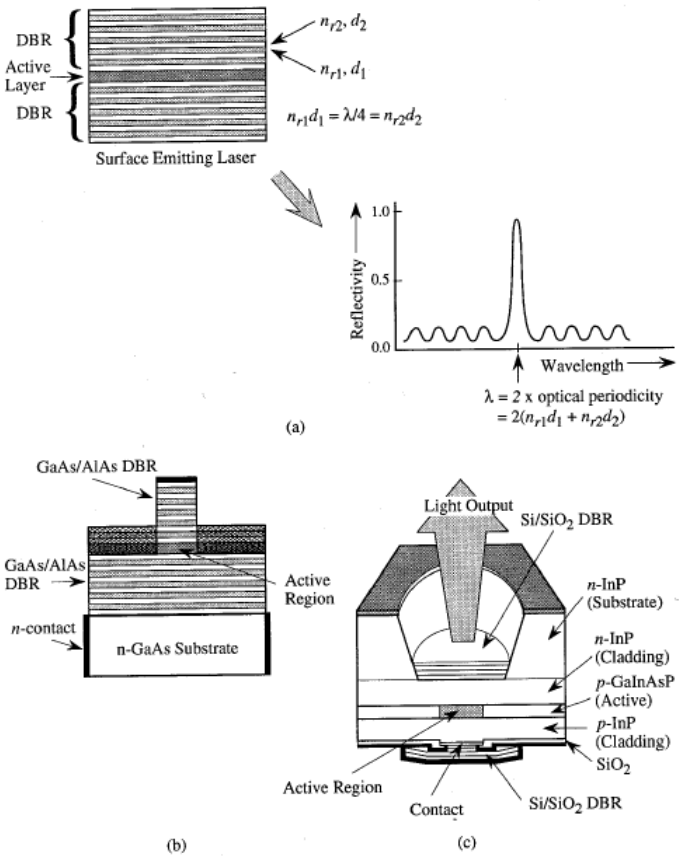


Figura 2.19: (a) Esquema de la localización de los reflectores DBR en un láser de emisión superficial. Se muestra esquema de la reflectividad. (b) Estructura típica de un DBR de GaAs / AlAs. (c) Estructura de DBR utilizando apilamientos de materiales amorfos.

de un láser puede ser elevada es difícil de controlar la fase de los diferentes láseres de una matriz siendo este uno de los puntos más investigados en la actualidad [20].

2.3. Modulación óptica

Un modulador fotónico consiste de una o múltiples fuentes de indas de luz, las cuales pueden ser moduladas *directamente* mediante la manipulación de la corriente que controla el diodo láser o *externamente* por medio de un modulador óptico integrado.

La modulación directa es la técnica que directamente manipula la emisión estimulada desde adentro de la cavidad láser, por medio de el efecto electro-óptico. En la modulación externa, el láser esta encendido todo el tiempo, esta onda de luz generada es acoplada a un modulador óptico integrado a través del cual se da el efecto electro-óptico causado por una señal eléctrica de entrada, dicho efecto modula el haz de luz en amplitud o fase. Los esquemas de modulación avanzados han atraído mucha atención recientemente por el mejoramiento de la eficiencia de transmisión desde mediados de 1980 para comunicaciones ópticas coherentes. Por lo tanto, la conservación de un ancho de línea espectral angosto del láser es crítico para la operación de tasas de bits en el rango de las decenas de Gb/s. En consecuencia la modulación externa es indispensable.

El modulador óptico es un dispositivo que utilizamos para codificar información en una señal óptica alternando su amplitud, fase o intensidad. Dependiendo de la aplicación, los moduladores se deben caracterizar según varios aspectos importantes para poder seleccionarlos. Básicamente son: el rendimiento de modulación, ancho de banda de la modulación, pérdidas de inserción, consumo y aislamiento entre canales [21]

- *Rendimiento de modulación*: Para definir el rendimiento de modulación, η, debemos conocer el tipo de modulación a utilizar. Para la modulación de intensidad donde la intensidad varía entre su valor máximo, I_{max}, y mínimo, I_{min}, el rendimiento vale,

$$\eta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}}$$

  La profundidad de modulación se define en decibelios como,

$$contraste = 10 \log \frac{I_{max}}{I_{min}}$$

  Si el modulador se utiliza para modulación de fase, el rendimiento vale,

$$\eta = sin^2 \frac{\phi}{2}$$

  donde ϕes el valor extremo del cambio de fase producido debido a la modulación

- *Ancho de banda de la modulación*: Como con otros dispositivos electrónicos u optoelectrónicos, cuando aumenta la frecuencia de funcionamiento, el rendimiento de modulación cae. La frecuencia a la cual el rendimiento de modulación cae 3dB con respecto a su valor a baja frecuencia se llama el ancho de banda de la modulación. El ancho de banda puede estar limitado por elementos parásitos (constantes de tiempo RC) o constantes de tiempo intrínsecas (por ejemplo, tiempo de tránsito de portadores) del dispositivo.

- *Pérdidas de inserción*: Cuando se acopla una señal óptica a un modulador habrá pérdidas de potencia. Si P_{out} es la potencia de salida de un sistema óptico cuando no hay modulador y P_{in} es la potencia transmitida por el sistema con el modulador y ajustado para máxima transmitancia, las pérdidas de inserción serán,

$$Perdidas\ [dB] = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

  Las pérdidas de inserción aparecen por la dispersión, reflexión y absorción que aparecen al colocar el modulador.

- *Consumo de potencia*: El consumo de potencia, como su nombre indica, es el consumo de potencia durante el proceso de modulación. Se define mediante la potencia por unidad de ancho de banda necesaria para la modulación de intensidad.

- *Aislamiento*: En muchos casos el modulador tiene varios canales. Se puede utilizar el modulador para transmitir una señal óptica desde una entrada a N salidas diferentes. El aislamiento describe la intensidad óptica que aparece en el canal de entrada j cuando es enviada una señal a través del canal i,

$$Aislamiento\ [dB] = 10\ \log \frac{I_i}{I_j}$$

En la mayoría de los sistemas ópticos se requiere un aislamiento de más de 40dB.

2.3.1. Modulación Directa

Para la modulación directa, fundamentalmente, la señal eléctrica inyectan portadores electrónicos dentro de la cavidad láser, los cuales son convertidos en haces de luz modulados de manera óptica, las cuales serán transmitidas a través de la fibra óptica. En este aspecto, un numero de láseres practicos tales como láseres especiales, láseres de realimentación distribuida (DFB) y láseres Fabry-Perot (FP) son modelados para el análisis y simulación de sistemas de comunicaciones ópticos de gran distancia y de alta velocidad [27].

La modulación directa consiste en aplicar una corriente al semiconductor tal, que ésta se encuentre por arriba de la corriente de umbral para un bit 1 o por debajo para un bit 0. La relación entre la potencia de salida para un 1 y para un 0 se llama razón de extinción o extinction ratio EX. Esta modulación es efectiva, aunque tiene graves desventajas: conforme la velocidad con que el láser se enciendo y se apaga, la luz tiende a cambiar, de manera que la luz que se recibe es menos clara y es más dificil de detectar de manera precisa. Esta variación es conocida como *chirp* que es una fluctuación en las componentes espectrales y/o en la amplitud de la potencia a la salida del dispositivo, provocando la necesidad de una modulación con un dispositivo independiente al láser, para altas frecuencias.

En la figura 2.20 muestra el circuito básico de modulación directa, el cual consiste simplemente en polarizar la fuente luminosa para que emita luz a razón de la señal modulante.

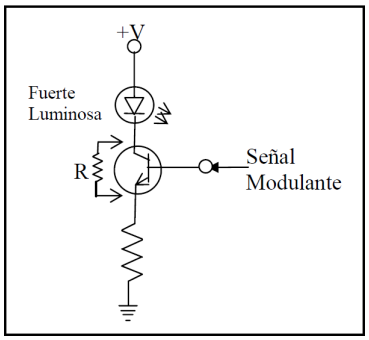


Figura 2.20: Circuito básico de polarización y modulación directa

La máxima velocidad de modulación de la fuente óptica depende básicamente del tiempo de recombinación de los portadores, así como de las capacidades asociadas al semiconductor. Este modo de modulación funciona para velocidades de modulación de hasta 600 Mbps.

2.3.2. Modulación Externa

Una manera de combatir el problema causado por el fenómeno de *chirp* es mediante la modulación externa, todos los moduladores empleados se basan en la variación que

sufren las propiedades de un material con la aplicación de determinadas señales de distinta naturaleza. Los dos tipos más empleados son los electroópticos (EOM) y los de electroabsorción (EAM). En los primeros es una señal eléctrica la que origina un cambio en el índice de refracción del material. Los segundos están basados en la absorción de luz cuando ésta atraviesa un semiconductor y sobre éste actúa un campo eléctrico.

2.3.2.1. Moduladores Electro-ópticos

Un modulador electro-óptico (EOM) puede modular la amplitud, la frecuencia o la fase de una señal óptica a partir del efecto electro-óptico o efecto Pockels, en el que modificamos las características ópticas de un cristal a partir de un campo eléctrico. Existen muchos cristales que poseen estas propiedades. Entre ellos el fosfato de dihidrógeno potasio (KDP), perosquitas ferroeléctricas como el $LiNbO_3$ y $LiTaO_3$ y semiconductores como el GaAs y CdTe.

Un ejemplo de modulador electro-óptico es el moduladoR Mach-Zehnder, el cual es un tipo de interferómetro donde dos guías de onda de material $LiNbO_3$ forman los dos brazos del interferómetro. En este caso, la aplicación de un campo eléctrico externo provocará el cambio del índice de refracción del material. En la ausencia de un campo externo, el campo óptico de la señal proveniente del láser experimentará un cambio de fase igual en los dos brazos, interfiriendo a la salida constructivamente. Sin embargo, cuando un campo eléctrico externo es aplicado a uno de los brazos, se logrará un desfasamiento de fase igual a π, lo que resultará en una interferencia destructiva. Este tipo de moduladores poseen una EX mayor a 25 dB [24].

Un modulador tipo MZ utiliza una estructura interferométrica implementada sobre un sustrato de Niobato de Litio (LiNbO3), como se muestra en la figura 2.21. En este dispositivo, la luz se divide en partes iguales entre dos guías de ondas paralelas en la superficie del sustrato y se recombina nuevamente en la salida. La variación en el índice de refracción se traduce en un cambio de alguna de las propiedades de la señal óptica: amplitud, frecuencia, fase o polarización, depende de la configuración del dispositivo, en particular, de las corrientes de polarización que controlan el elemento modulador y que tienen incidencia directa en los indices de modulación, relación de extinción y potencia de la señal modulada.

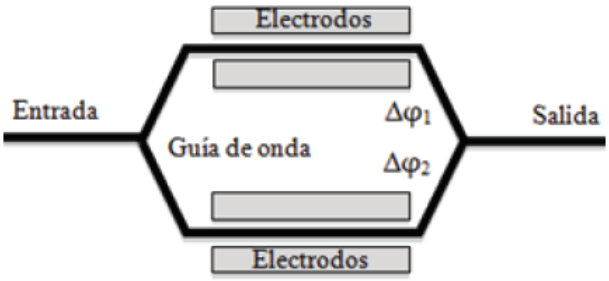


Figura 2.21: Modulador MZ de doble brazo

En este contexto, una tensión de control (V) aplicada a los electrodos que se muestran en la figura 2.21, genera un cambio en el índice de refracción a través del efecto electro-óptico. Esto provoca un cambio en la constante de propagación y un desplazamiento de fase relativo en el punto donde las dos ondas se combinan. Cuando no

hay tensión, el desplazamiento de fase relativa es cero y la señal recombinada sale del dispositivo sin atenuación (a excepción de las pérdidas en las guías de onda). Cuando se aplica una tensión (Vπ) que produce un desplazamiento de fase de π entre los dos brazos, la señal se extingue, por lo tanto, el dispositivo actúa como un interruptor controlado por tensión. Estos dispositivos funcionan a velocidades de hasta 50 Gb/s. Es importante destacar que Vπ es un parámetro propio de cada modulador.

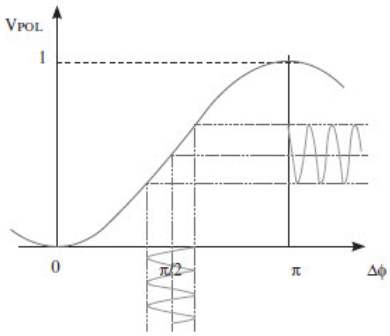


Figura 2.22: Curva de transferencia de potencia de un modulador MZ

Un modulador tipo MZ también permite la aplicación de voltajes de control en ambas guías de onda, lo que resulta en un dispositivo modulador externo de doble control. Esta característica permite la generación de señales en cuadratura arbitrarias que encuentran aplicación en procedimientos de transmisión, tales como modulación de portadora óptica suprimida. La figura 2.22 muestra la curva de transferencia de un modulador tipo MZ. Esta curva representa la transferencia de potencia óptica del dispositivo, en función del desfase eletro-óptico inducido sobre la señal óptica.

Este desfase depende a su vez de la tensión de polarización aplicada sobre los electrodos. Como se puede observar, existe una región donde la función de transferencia tiene carácter lineal, y por consiguiente, resulta óptima para la modulación de la señal eléctrica sobre la portadora óptica. El dispositivo trabaja en régimen lineal cuando se aplica una tensión de polarización tal que se induce un desfase sobre la señal óptica igual a $\frac{\pi}{2}$, y además los niveles de tensión aplicados son lo suficientemente pequeños para no distorsionar la señal de información. Las ecuaciones de modelado del modulador MZ tienen como finalidad obtener la expresión del campo eléctrico de la señal óptica a la salida del dispositivo, en función de las diferentes señales de entrada y de algunos parámetros del mismo. Como punto de partida, se formula una primera aproximación que proporciona el campo eléctrico a la salida del dispositivo en función del campo eléctrico a la entrada y de los desfases inducidos por las señales eléctricas aplicadas sobre los electrodos del modulador MZ como consecuencia del efecto electroóptico. La ecuación de campo se establece a partir de la geometría del modulador. En el dispositivo mostrado en la figura 2.22, se aplica una señal eléctrica sobre uno de los dos brazos del interferómetro. Esta señal provoca mediante el efecto electroóptico un cambio de fase sobre la señal óptica que se propaga por dicho brazo. La función de transferencia se puede expresar en términos del coeficiente de acoplo de la propagación del campo y el desfase producido en la señal en ambas ramas del interferómetro de la siguiente forma:

$$E_{out}(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) E_{in}(t) \frac{A_1 e^{j\Delta\phi_1} + A_2 e^{j\Delta\phi_2}}{\alpha} \tag{2.3}$$

donde:

α= atenuación de la señal a su paso por el dispositivo

A_1 y A_2= coeficientes de acoplo de las ramas superior e inferior, respectivamente, en el modelo del modulador de control doble mostrado en la figura 2.21

ϕ_1 y ϕ_2= desfases en cada una de las ramas debido al efecto electro-óptico.

Estas variables se pueden expresar de la siguiente forma:

$$A_1 = \alpha = \sqrt{0{,}5 + \varepsilon}$$

en donde ε representa la diferencia entre los coeficientes de acoplo de propagación de energía de la rama superior e inferior. Para un modulador MZ ideal, $\varepsilon = 0$, lo cual indica que la potencia se divide en partes iguales en las dos ramas.

$$A_2 = \sqrt{1 - \alpha^2}$$

$$\Delta\phi_1 = \frac{\pi}{V_{\pi(RF)}} V_{1(RF)}(t) + \frac{\pi}{V_{\pi(dc)}} V_{1(dc)}$$

$$\Delta\phi_2 = \frac{\pi}{V_{\pi(RF)}} V_{2(RF)}(t) + \frac{\pi}{V_{\pi(dc)}} V_{2(dc)}$$

Los términos de variación de fase $\Delta\phi$ dependen de la tensión de polarización $V_{(dc)}$, este valor se define como aquella tensión que aplicada sobre lo electrodos del dispositivo provoca un cambio de fase de 180° sobre la señal óptica que se propaga por la guía de onda como consecuencia del efecto electro-óptico. Del mismo modo depende de V_{RF}, el cual representa el voltaje necesario en las entradas de RF (superior e inferior) para provocar un cambio de fase de 180° entre los dos brazos del interferómetro. Si se asume un coeficiente de acoplo A_1=A_2=0.5, y α=2 (para unas pérdidas de inserción típicas de un modulador MZ de 6dB), la ecuación 2.3 se puede expresar como:

$$E_{out}(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) E_{in}(t) \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) e^{j\Delta\phi_1} + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) e^{\pm j\Delta\phi_2}}{2}$$

Simplificando se obtiene la expresión general del campo eléctrico a la salida del modulador MZ:

$$E_{out}(t) = \left(\frac{1}{4}\right) E_{in}(t)[e^{j\Delta\phi_1} + e^{\pm j\Delta\phi_2}]$$

2.3.2.2. Moduladores de Electro-absorción

Los moduladores de electro-absorción (EAM) son un tipo de dispositivo de semiconductor que hace uso del efecto Franz-Keldysh, en el cual la separación entra la banda de valencia y la de conducción de un semiconductor disminuye cuando un campo eléctrico es aplicado sobre éste. Por lo que un semiconductor, que en un principio era transparente para cierta región de longitudes de onda, empieza a absorber luz cuando su banda e conducción se reduce por la aplicación de un voltaje externo. El modulador de electro-absorción puede estar integrado con la estructura láser en el mismo circuito integrado. Para el modulador $LiNbO_3$, el dispositivo es externamente conectado al láser por medio de fibra óptica.

Las perdidas por inserción totales de un modulador de intensidad de semiconductor son de aproximadamente 8-10 dB incluyendo las perdidas del acople fibra-guía de onda, el cual es un poco alto. Sin embargo, estas perdidas pueden ser compensadas por un amplificador óptico de semiconductor (SOA) el cual puede ser integrado en el mismo empaque. Este tipo de dispositivo integrado (láser-EA-SOA) es comúnmente conocido como EML (láser modulador de electro-absorción).

El voltaje que controla el EAM es usualmente mas bajo que el requerido para los de tipo $LiNbO_3$. Sin embargo, la relación de extinción no es tan alto como el de tipo$LiNbO_3$ el cual es alrededor de 25 dB, comparada con los 10 dB para el EAM. El voltaje que controla a un EAM es aproximadamente 3-4 V, a comparación de 5-7 V para los de tipo $LiNbO_3$.

Los moduladores EAM son pequeños y puede ser integrados con el láser en el mismo sustrato como se muestra en la figura 2.23. Un modulador EAM combinado con un láser de onda continua es conocido como un láser de electro-absorción modulado (EML).

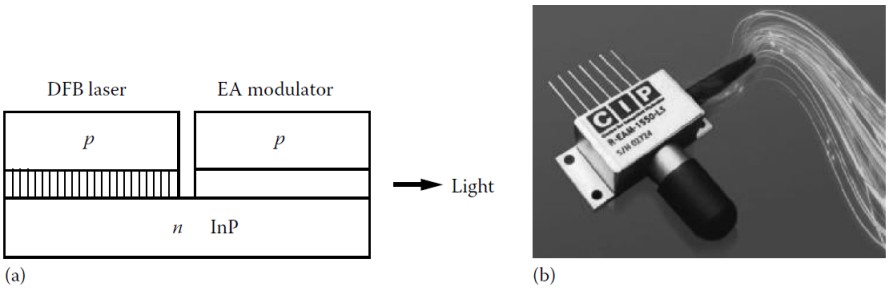


Figura 2.23: (a) Estructura tipida de un EAM integrado con un láser DFB en el mismo sustrato de fosfuro de indio (InP); (b) Empaque de un EAM de Huawei del Centro de Fotónica Integrada de Inglaterra

Un EML consiste de un láser DFB seguido de un EAM, como se mencionó en el anterior párrafo. Ambos dispositivos pueden ser integrados monolíticamente en el mismo sustrato de fosfuro de indio, permitiendo un diseño compacto y bajas pérdidas de acople entre los dos dispositivos.El EAM consiste en una región activa semiconductora colocada entre una capa dopada de tipo p y n, formando una unión $p-n$. Como se mencionó anteriormente, el EAM trabaja bajo el principio del efecto Franz-Keldysh, en donde la banda de conducción eficaz de un semiconductor disminuye con un aumento del campo eléctrico.

Sin un voltaje de polarización a través de la unión $p-n$, la banda de conducción de la región activa es lo suficientemente ancha como para ser transparente a la longitud de onda de la luz láser. Sin embargo, cuando se aplica un voltaje inverso suficientemente grande en la unión $p-n$, la banda de conducción eficaz es reducida al punto en que la región activa comienza a absorber el haz de luz, volviéndose opaca.

La relación entre la potencia óptica de salida , P_{out} y el voltaje de polarización aplicado, V_m, de un EAM es descrito por curva mostrada en la figura 2.24, en donde se muestra la curva de una relación de extinción (ER) dado un voltaje V_{SW}. El voltaje V_{SW}, el cual se define como la tensión necesaria para cambiar el modulador del estado ON a el estado OFF esta en un rango típico de 1.5-4 V, y la relación de extinción ER,

está usualmente en el rango de 11-13 dB.

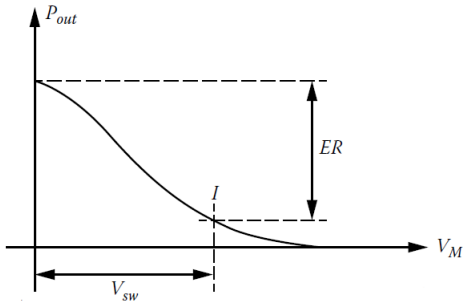


Figura 2.24: Curva de transferencia de un EAM

Comparado con un modulador electro-óptico, un modulador de electro-absorción puede operar con voltajes menores, unidades de voltios en lugar de décimas de voltios. Pueden operar a una alta velocidad; puede ser logrado un ancho de banda de modulación de decenas de GHz, características que lo hacen un dispositivo útil en comunicaciones de fibra óptica. Una configuración conveniente es cuando el EAM puede ser integrado con un láser DFB en un único microcircuito, comparado con la modulación directa del láser, se obtiene un mayor ancho de banda y una reducción del fenómeno *chirp*. Una de las desventajas del EAM es que la relación de extinción no es tan alta comparada con el EOM.

2.4. Métodos de generación de RoF

La señal en un sistema radio sobre fibra se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$V_{RF}(t) = c(t) + e(t)cos(\omega_e t + \alpha_e) \tag{2.4}$$

Donde $c(t)$ es cualquier señal de banda base con cierta velocidad binaria transportada en la portadora óptica y $e(t)$ es la señal de datos que modula la portadora de RF definida por ($\omega_e = 2\pi f_e$) más una constante de fase α_e. El índice de modulación (IM) se define a través de la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la tensión de desplazamiento de fase V_π

$$IM_{señal} = \frac{V_{señal}}{V_\pi}$$

En esta sección se presentarán diferentes configuraciones de sistemas que permiten la generación de señales RoF usando técnicas de combinación óptica. Para cada una de ellas se presenta el modelo analítico, teniendo en cuenta que se tiene una señal en banda base $c(t)$ y una en RF $e(t)$, las cuales se definen respectivamente por:

$$\begin{aligned} c(t) &= A_1 V_{BB}(t) + V_{dcBB} \\ e(t) &= A_2 V_{DRF}(t) \end{aligned}$$

La señal de banda base $c(t)$ está conformada por una señal de infomación de banda base $V_{BB}(t)$ de amplitud A_1 y un voltaje DC V_{dcBB}. Por otro lado, la señal de radiofrecuencia $e(t)$ está confomada por una señal de datos $V_{DRF}(t)$, con amplitud A_2. [17]

2.4.1. Generación en brazo doble

En este modelo la señal de banda base y radiofrecuencia se introducen al modulador Mach Zehnder por sus brazos superior e inferior, respectivamente. La figura 2.25 muestra la configuración para dicho sistema.

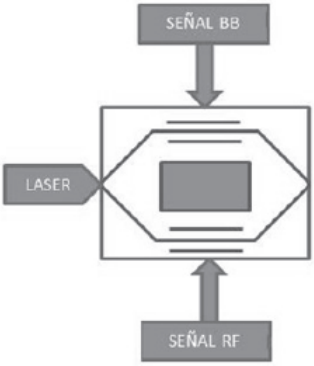


Figura 2.25: Modelo de modulación externa con dos brazos con MZ

Para este modelo la ecuación que describe el campo eléctrico a la salida es:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}}{2} cos\left(\frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{2}\right) e^{\frac{j(\Delta\phi_1+\Delta\phi_2)}{2}} \tag{2.5}$$

En donde la señal de banda base y de radiofrecuencia se introducen de manera independiente por cada uno de los brazos del modulador, de la siguiente manera:

$$\Delta\phi_1 = \frac{\pi}{V_{\pi(RF)}}[A_1 V_{BB}(t) + V_{dcBB}] + \frac{\pi}{V_{\pi(dc)}} V_{1(dc)} \tag{2.6}$$

$$\Delta\phi_2 = -\left[\frac{\pi}{V_{\pi(RF)}} A_2 V_{DRF}(t) cos(\omega_e t + \varphi_e) + \frac{\pi}{V_{\pi(dc)}} V_{2(dc)}\right] \tag{2.7}$$

Reemplazando 2.6 y 2.7 en 2.5 se obtiene la expresión 2.8 para el campo eléctrico de salida.

Nótese que en 2.8 se presenta un cambio de signo debido a un desfase de 180° generado por la configuración inteferométrica del modulador, la cual contribuye a la reducción del fenómeno de *chirp*. Finalmente se obtiene una expresión para el campo de salida en función de los indices de modulación de banda base y radiofrecuencia para el modelo de generación de doble brazo (ecuación 2.9). [17]

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}}{2} cos\left(\frac{\pi}{2V_{\pi(RF)}}[A_1 V_{BB}(t) + V_{dcBB} + A_2 V_{DRF}(t) cos(\omega_e t + \phi_e)] + \frac{\pi}{2V_{\pi(dc)}}[V_{1(dc)} + V_{2(dc)}]\right) e^{\frac{j(\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2)}{2}} \tag{2.8}$$

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}}{2} cos\left(\frac{\pi}{2V_{\pi(RF)}} + \frac{\pi}{2} m_{BB} V_{BB}(t) + \frac{\pi}{2} m_{RF} V_{DRF}(t) cos(\omega_{osc} t + \phi_{osc}) + \frac{\pi}{2V_{\pi(dc)}}[V_{1(dc)} + V_{2(dc)}]\right) e^{\frac{j(\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2)}{2}} \tag{2.9}$$

En donde:
m_{BB}= índice de modulación en banda base
m_{RF}= índice de modulación de radiofrecuencia

2.4.2. Generación en paralelo

En este esquema tanto la señal de banda base como la señal de radiofrecuencia se modulan independientemente por cada Mach Zehnder para posteriormente multiplexarse mediante un acoplador óptico. El esquema para esta configuración se muestra en la figura 2.26. Para este modelo las ecuaciones que describen los campos de salida se muestran a continuación:

$$E_{out1}(t) = \frac{E_{in}}{\sqrt{2L_{mz1}}} cos\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right) e^{\frac{j\Delta\phi_1}{2}}$$

$$E_{out2}(t) = \frac{E_{in}}{\sqrt{2L_{mz2}}} cos\left(\frac{\Delta\phi_2}{2}\right) e^{\frac{j\Delta\phi_2}{2}}$$

Donde L_{mz} son las pérdidas del modulador. Puesto que la señal de banda base y radiofrecuencia se modulan de manera independiente en cada modulador MZ, los campos de salida quedan definidos con las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$E_{out1}(t) = \frac{E_{in}}{\sqrt{2L_{mz1}}} cos\left(\frac{\pi}{2V_{\pi(RFMZ1)}}[A_1 V_{BB}(t) + V_{dcBB}] + \frac{\pi}{2V_{\pi(dcMZ1)}} V_{1dcMZ1}\right) e^{\frac{j\Delta\phi_{MZ1}}{2}} \quad (2.10)$$

$$E_{out2}(t) = \frac{E_{in}}{\sqrt{2L_{mz2}}} cos\left(\frac{\pi}{2V_{\pi(RFMZ2)}} A_2 V_{DRF}(t) cos(\omega_e t + \varphi_e) + \frac{\pi}{2V_{\pi(dcMZ2)}} V_{1dcMZ2}\right) e^{\frac{j\Delta\phi_{MZ2}}{2}} \quad (2.11)$$

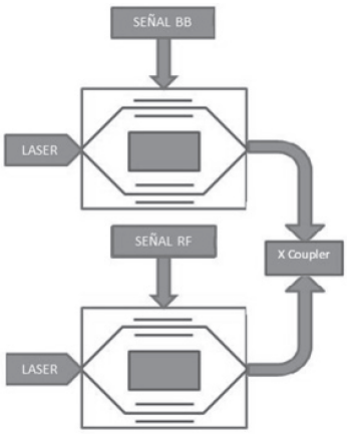


Figura 2.26: Esquema de modulación externa con dos moduladores MZ en paralelo

Donde los subíndices MZ1 y MZ2 corresponden al modulador 1 y 2, respectivamente. Si se desea determinar un campo total de salida se utiliza un acoplador para obtener la suma de los campos de salida e ambos moduladores, que se describe por el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} E_{outT1} \\ E_{outT2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\alpha} & j\sqrt{\alpha} \\ j\sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix}$$

A partir del acoplador se determina la siguiente expresión para el campo de salida

$$E_{outT1} = \sqrt{1-\alpha}E_{out1} + j\sqrt{\alpha}E_{out2}$$

Finalmente y considerando las mismas pérdidas en los dos moduladores y un valor en el coeficiente de acoplo α que garantice una distribución equitativa del campo, se obtiene la expresión 2.12 del campo eléctrico en función de los indices de modulación de banda base y radiofrecuencia. [17]

$$\begin{aligned} E_{outT1} &= \frac{E_{in}}{4}\left[cos\left(\frac{\pi}{2}m_{BB}V_{BB}(t) + \frac{\pi}{2V_{\pi(RFMZ1)}}V_{dcBB} + \frac{\pi}{2V_{\pi dcMZ1}}V_{1dcMZ1}\right)e^{\frac{j\Delta\phi_{1MZ1}}{2}}\right] \\ &+ j\frac{E_{in}}{4}\left[cos\left(\frac{\pi}{2}m_{RF}V_{DRF}(t)cos(\omega_e t + \varphi_e) + \frac{\pi}{2V_{\pi dcMZ2}}V_{1dcMZ2}\right)e^{\frac{j\Delta\phi_{1MZ2}}{2}}\right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.4.3. Generación en serie

En este esquema la señal de banda base y la señal de radiofrecuencia se modulan de manera independiente por dos Mach Zehnder que siguen una configuración en serie. La combinación es por lo tanto óptica, ya que la salida modulada del primer MZ actúa como entrada al segundo modulador. La figura 2.27 muestra la arquitectura de este esquema de generación.

Los campos de salida de cada uno de los moduladores MZ de este modelo se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} E_{outMZ1}(t) &= \frac{E_{in}}{2}cos\left(\frac{\Delta\phi_{1MZ1}}{2}\right)e^{\frac{j\Delta\phi_{1MZ1}}{2}} \\ E_{outMZ2}(t) &= \frac{E_{outMZ1}(t)}{2}cos\left(\frac{\Delta\phi_{1MZ2}}{2}\right)e^{\frac{j\Delta\phi_{1MZ2}}{2}} \end{aligned}$$

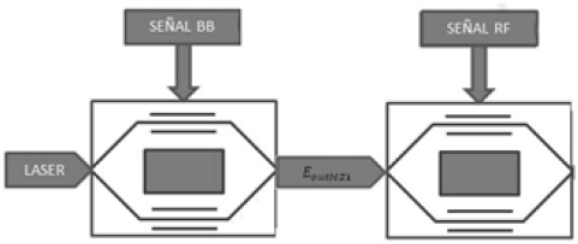


Figura 2.27: Esquema de modulación externa con dos moduladores MZ en serie

Al igual que en el esquema de generación en paralelo, las señales de banda base y radiofrecuencia se introducen de manera independiente en cada modulador MZ, de este modo se obtiene el siguiente campo de salida para el primer modulador (ecuación 2.13).

$$E_{outMZ1}(t) = \frac{E_{in}}{2} cos\left(\frac{\pi}{2V_{\pi(RFMZ1)}}[A_1 V_{BB} + V_{dcBB}] + \frac{\pi}{2V_{\pi dcMZ1}} V_{1dcMZ1}\right) e^{\frac{j\Delta\phi_{MZ1}}{2}} \tag{2.13}$$

Puesto que el campo de entrada del segundo modulador corresponde al campo de salida del primer modulador, se obtiene la expresión de campo eléctrico en función de los índices de modulación de las señales de banda base y radiofrecuencia (ecuación 2.14). [17]

$$\begin{aligned} E_{out2}(t) = \frac{E_{in}}{4} cos\left(\frac{\pi}{2} m_{BB} V_{BB}(t) + \frac{\pi}{2V_{\pi(RFMZ1)}} V_{dcBB} + \frac{\pi}{2V_{\pi dcMZ1}} V_{1dcMZ1}\right) \\ *cos\left(\frac{\pi}{2} m_{RF} V_{DRF}(t) cos(\omega_e t + \varphi_e) + \frac{\pi}{2V_{\pi dcMZ2}} V_{1dcMZ2}\right) e^{\frac{j(\Delta\phi_{1MZ1} + \Delta\phi_{1MZ2})}{2}} \end{aligned} \tag{2.14}$$

Capítulo 3

Transmisión de una subportadora de RF

En este capítulo se describirán detalladamente las características de cada uno de los componentes requeridos para generar, transmitir y recibir la respectiva información que será modulada en radiofrecuencia. Primero se describen las características del generador óptico, aspectos como frecuencia portadora, anchura espectral y potencia son detallados. Luego se describen los principales aspectos referente a los datos, tales como la tasa de transmisión, el tipo de codificación y la frecuencia de subportadora utilizada. Después se detalla del modulador óptico el cual tiene como característica la relación de extinción. Luego se describen los componentes utilizados para la transmisión de la señal óptica a través de una fibra óptica y la conversión de la señal al dominio óptico mediante un fotodetector. Por último se detalla los componentes para la recuperación de la señal transmitida, tales como filtro y demodulador (esto con el fin de establecer el método para separar las subportadoras con las que se trabajarán en capítulos posteriores). Por último se realizan varias pruebas para identificar el efecto de supresión de portadora, como afecta esto en el diagrama de ojo de la señal resultante y se obtiene una gráfica de la variación del factor Q máximo con respecto a la distancia del enlace.

Primero con ayuda de lo visto en el capitulo anterior, se escogerá el generador adecuado, este deberá proporcionar un haz de luz con las características suficientes para transmitir la respectiva información a través de un enlace de una distancia en el orden de Km. Igualmente se tiene en cuenta el tipo de información que se va a transmitir, datos los cuales no están en banda base, sino que al contrario son datos modulados por una portadora de RF en el dominio eléctrico, señal que posteriormente pasará al dominio óptico. Para escoger el generador utilizado en la simulación se deben tener en cuenta las siguientes transparencias.

Un generador de luz LED tiene un espectro bastante amplio el cual es un problema, debido a que la velocidad de propagación en una fibra depende de la longitud de onda, si un pulso esta formado por múltiples longitudes de onda luego este se ensanchará con el tiempo (dispersión cromática), luego el uso de un LED se reduce a comunicaciones de corta distancia, en donde la dispersión cromática sea despreciable [19]. Debido a que se requiere que la señal óptica se transmita a través de decenas de Km, se escoge un generador óptico **láser**.

Una vez se sabe que se utilizará un láser, se procede a escoger el tipo de láser a utilizar, teniendo en cuenta que todos los láseres funcionan de la misma manera (emisión estimulada de fotones), en donde el aspecto diferenciador de cada uno es la cavidad

óptica por la cual son guiados los fotones estimulados. La más común es la de tipo Fabry-Perot, el problema de esta cavidad es que se generan varios modos alrededor de la portadora, con una separación de 0.4 nm a 0.5 nm entre modos y una anchura espectral del láser de 2 nm. En principio se desea transmitir más de una subportadora de RF a través del dominio óptico, luego entre más "pura"sea la portadora óptica del generador, la potencia será mejor aprovechada, por lo tanto se descarta el láser de cavidad Fabry-Perot.

Una de las cavidades utilizadas en los láseres es la DFB (Distributed Feedback), el láser de realimentación distribuida en donde se incorpora un enrejado periódico en la estructura en las proximidades de la región activa. Este enrejado actúa como un espejo, reflejando de forma selectiva según la longitud de onda, esto permite que el láser produzca una única longitud de onda, de una pequeña anchura espectral y sin armónicos. Es por esta razón que el dispositivo generador escogido es un **láser de cavidad DFB**.

Se buscaron otras opciones las cuales pudieran reemplazar o competir con el láser DFB, una de ellas fue el el láser de emisión superficial SEL o láseres de emisión superficial con cavidad vertical (VCSEL), de los cuales se pueden formar matrices de dichos láseres pudiendo obtener potencias de hasta 1W como se detalló en el capítulo anterior, el problema es que son más utilizados en la primera ventana óptica alrededor de 850 nm, y que en general se utilizan para aplicaciones de corto alcance, pudiendo alcanzar una tasa de velocidad de 10 Gbit/s en unos pocos cientos de metros. Debido a que se escogió trabajar en una portadora óptica en la tercera ventana de 1550 nm y es una aplicación para distancias de decenas de kilómetros, se decidió no cambiar el láser DFB escogido con anterioridad.

Una vez escogido el tipo de generador a utilizar, se proceden a definir más características del diseño, al establecer un enlace de aproximadamente 50 Km se asume la utilización de fibra monomodo estándar, ya que las fibras multimodo son utilizadas para aplicaciones de corta distancia. Una vez definida la utilización de fibra monomodo estándar, se escoge la longitud de onda a trabajar, en este caso para disminuir la atenuación de la señal por cada kilómetro de la fibra óptica se elige trabajar en la tercera ventana (1550nm) en donde la atenuación es la menor para una fibra óptica monomodo (menos de 0.5 dB/km). Se escoge la utilización de fibra monomodo estándar ya que es la que esta instalada en la mayoría de sistemas de comunicaciones ópticas, un parámetro importante de dicha fibra es la dispersión cromática, la cual tiene un valor máximo de 20 ps/(nm·km) y el fabricante Corning específica en su hoja de datos que para la fibra óptica SMF-28e+ tiene un valor menor a 18 ps/(nm·km) [29].

Por otra parte se mencionan las características de los datos que se van a generar, la tasa de bits con la que se trabajará y el método de modulación a utilizar, estos parámetros se escogerán de manera aleatoria ya que podrían tomar cualquier valor (dentro de un rango específico) y no son muy influyentes al momento de realizar la simulación, por lo tanto se asumen varios valores a trabajar, primero se asume que los datos en banda base que van a ser modulados en el dominio eléctrico se están transmitiendo a una velocidad de 2,5 Gbps. Igualmente se asume que estos datos serán generados por el método NRZ (Non Return to Zero). Posteriormente se escoge el método de modulación eléctrica OOK (On-Off Keying), al igual que en la parte anterior debido al gran rango de servicios que se pueden transmitir en la banda de radio frecuencia se asume una frecuencia de 15 GHz, las pruebas realizadas con este tipo de modulación podría servir de referencia, ya que los resultados obtenidos de esta manera son los del peor caso,

refiriéndose a que si se emplea una técnica mas avanzada de modulación se mejoran aspectos como el ancho de banda utilizado (se reduce).

Por último se eligen las características del modulador externo el cual a través de un puerto de entrada, ingresará la señal del láser utilizado, y por el puerto de la información que se transmitirá se ingresarán los datos modulados en la banda de radio frecuencia en el dominio eléctrico, utilizando el principio de la modulación electro-óptica mencionado en el capítulo anterior. Una vez se tiene el láser en el puerto de entrada y los datos modulados por el primer brazo, el dispositivo se encargará de enviar la información a través del láser en la tercera ventana óptica.

En resumen el generador del sistema diseñado será un láser DFB, trabajando en la tercera ventana óptica, este tipo de láser proporciona un espectro frecuencial sin armónicos alrededor de la portadora óptica. Por otra parte en la tercera ventana la fibra monomodo (escogida debido a la larga distancia del enlace) nos proporciona una constante de atenuación mínima. Escogido el láser a trabajar se genera una señal de bits aleatorios de 2,5 Gbps los cuales van a ser modulados en la frecuencia de 15 GHz, por último el láser y los datos en RF ingresarán al modulador externo MZM, el cuál pasara la señal en el dominio eléctrico al dominio óptico "sobre" una portadora óptica.

3.1. Generador y sus características

En el simulador OptiSystem 7.0, en el apartado de transmisores ópticos se tiene una variedad para pode utilizar, debido a que no hay propiamente un DFB se utiliza el elemento **CW Laser** y dependiendo de la configuración implementada, puede simular cualquier tipo de fuente óptica sea un LED o un Láser DFB.

Con fines de mostrar resultados posteriores en el dominio de la frecuencia, se procede a realizar la conversión de la longitud de onda del láser a frecuencia.

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} \tag{3.1}$$

En donde λ es la longitud de onda utilizada, en este caso $\lambda = 1550\ nm$, y c es la velocidad de la luz en el vacio, $\left(c = 299\ 792\ 458 \frac{m}{s}\right)$. Por lo tanto, utilizando la ecuación 3.1:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{299\ 792\ 458 \frac{m}{s}}{1550\ nm} \\ f_0 &= 193{,}41\ THz \end{aligned}$$

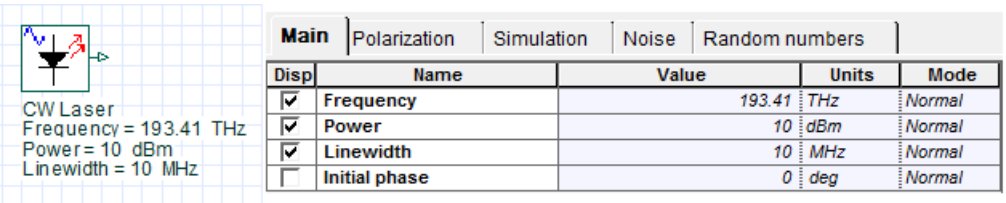


Figura 3.1: Configuración del generador a partir de un láser de onda continua (CW Láser)

La configuración de las características básicas del elemento CW Láser se muestra en la figura 3.1. Como se puede observar se selecciona la frecuencia portadora, la potencia

de salida del dispositivo y la anchura espectral. En este caso se seleccionó **1550 nm**, **10 dBm** y **10 MHz**, respectivamente. Por otra parte permite la configuración de la fase inicial, parámetro que no es relevante por lo que no se modifica.

Una vez configurado correctamente el láser, verificamos que trabaja correctamente en la simulación, para ello se coloca un Analizador de Espectro Óptico, en donde veremos en el dominio de la frecuencia la señal generada por el láser, dicha señal se muestra en la figura 3.2, en donde podemos observar como se explicó anteriormente la frecuencia portadora es de 193.41 THz (1550 nm), por último debido a la anchura espectral de 10MHz es muy difícil observarla ya que es muy pequeña comparada con la frecuencia que se está trabajando.

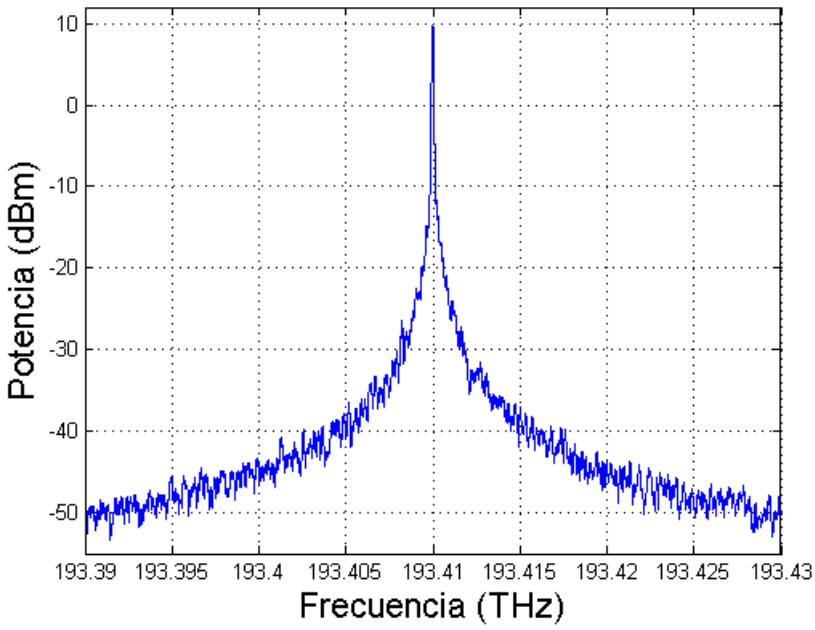


Figura 3.2: Espectro de frecuencia del láser configurado

3.2. Portadora de RF y sus características

Por otra parte se deben obtener los datos que se quieren modular en una portadora de RF, la portadora misma y el tipo de modulación a utilizar, asumiendo que tenemos una tasa de transmisión de 2.5 Gbps. Con la tasa de transmisión de bits se puede obtener el tiempo de bit.

$$
\begin{aligned}
f_b &= 2{,}5\ Gbps \\
t_b &= \frac{1}{f_b} \\
t_b &= 0{,}4\ ns
\end{aligned}
$$

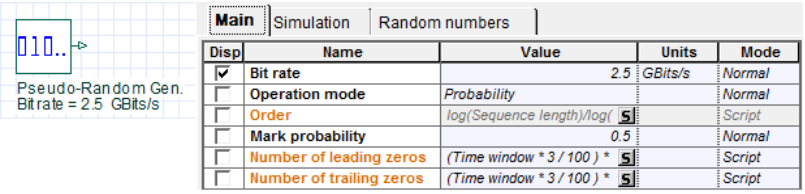


Figura 3.3: Configuración del generador pseudo-aleatorio de bits

Luego se procede a simular la señal en banda base para lo cual se escogió un bloque generador de bits pseudo-aleatorios, el cual tiene las características que se muestran en la figura 3.3. Dichas caracteristicas son:

- Bit rate: Es la tasa de bits que genera el bloque, mostrada en este caso en Gbps.
- Operation Mode: Es el modo de trabajo del bloque el cual puede ser de cinco (5) formas distintas: Probabilidad, Orden, Alternado, Solo Unos o Solo Ceros.
    - Probabilidad: En este caso se configura un número de 0 a 1 en donde se indica la probabilidad de que se genere un Uno Lógico.
    - Orden: En este caso se configura un número k y posteriormente se genera una secuencia de números con periodo de $T = 2^k - 1$.
    - Alternado: En este caso se genera una secuencia de Unos y Ceros de manera alternada.
    - En los otros dos modos se tiene que se genera únicamente una trama de Unos o Ceros.

En este caso se escogió el modo de Probabilidad, con una constante de 0.5, es decir una probabilidad del 50 % de generar un Uno Lógico.

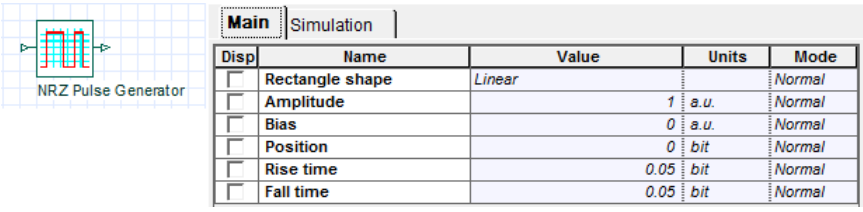


Figura 3.4: Configuración del bloque generador de la señal NRZ

Posteriormente debido a que se necesitan estos bits expresados como una señal eléctrica se utiliza un generador NRZ (Non Return to Zero) el cual tiene las características mostradas en la figura 3.4. Dichas características son:

- Rectangle Shape: En esta parte se puede seleccionar la forma en que inicia y termina cada bit de cuatro (4) maneras diferentes: Lineal, Gaussiana, Senoidal o Exponencial. Se elije de manera Lineal.

La señal proporcionada por el bloque generador NRZ se muestra en la figura 3.5.

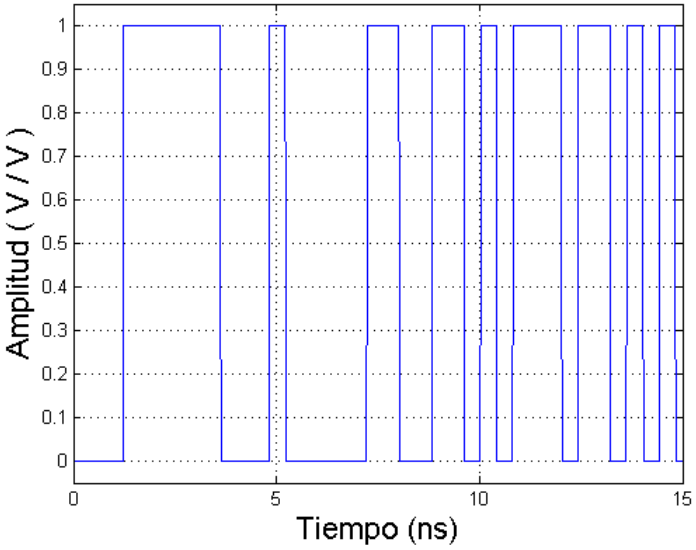


Figura 3.5: Señal generada por el bloque NRZ.

Una vez se obtiene la señal de salida del generador NRZ se procede a seleccionar la manera de modular los datos, para este caso se selecciona la modulación binaria sencilla o OOK (On-Off Keying), para ello se elige el bloque Modulador Eléctrico de Amplitud el cual tiene las características que se muestran en la figura 3.6. Dichas características son:

- Frequency: Esta es la frecuencia portadora a la cual se modularán los datos de entrada. Se escoge para este caso 15 GHz

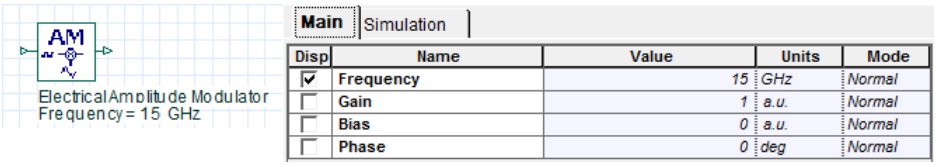


Figura 3.6: Configuración del bloque modulador eléctrico AM

El voltaje de salida del modulador AM se muestra en la ecuación 3.2.

$$V_{out}(t) = G\ V_{in}(t)\ cos(2\pi f_c t + \phi_c) + b \tag{3.2}$$

En donde V_{in} es la señal eléctrica de entrada, G es el parámetro de ganancia, b es el nivel DC, f_c es la frecuencia portadora y ϕ_c es la fase de la portadora.

Una vez se tiene el generador de bits pseudo-aleatorios, el bloque generador de la señal NRZ y el modulador eléctrico AM la señal obtenida se muestra en la figura 3.7.

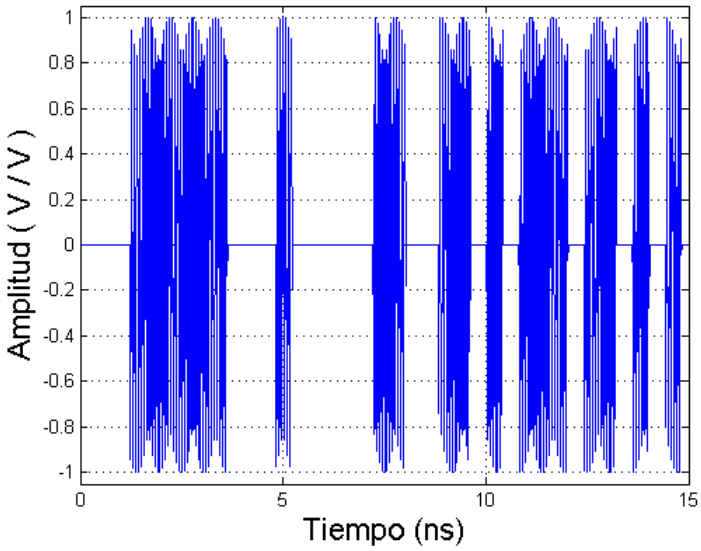


Figura 3.7: Datos a 2.5 Gbps modulados por una portadora de 15 GHz

Por otra parte se puede visualizar en el dominio de la frecuencia, el espectro de la señal modulada el cual se puede observar en la figura 3.8.

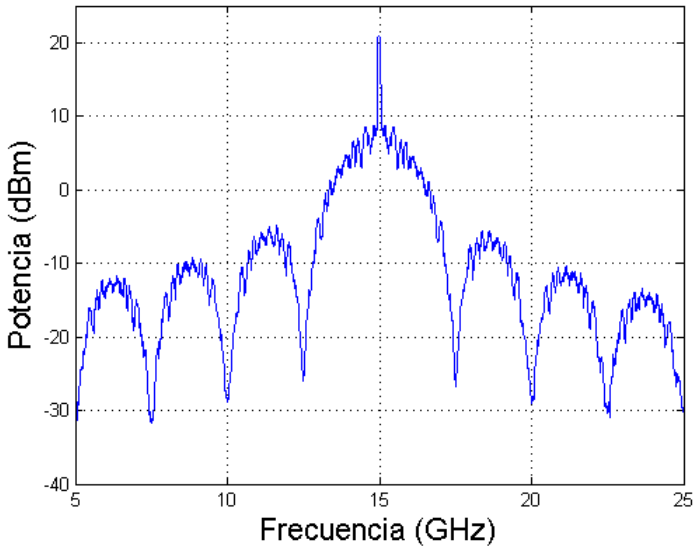


Figura 3.8: Espectro de frecuencia de la señal de datos modulados a 10GHz

3.3. Modulador óptico y sus características

Luego de lo detallado en el capítulo anterior se procede a utilizar un modulador externo, ya que como se mencionó anteriormente al estar utilizando datos modulador en radio frecuencia, la modulación directa del láser no es adecuada. Dicho esto los datos generados en la sección 3.2, mediante el láser descrito en la sección 3.1, el modulador escogido tiene las características mostradas en la figura 3.9. Simplemente se configura la relación de extinción de 30 dB. y se dejan todos los otros valores por defecto.

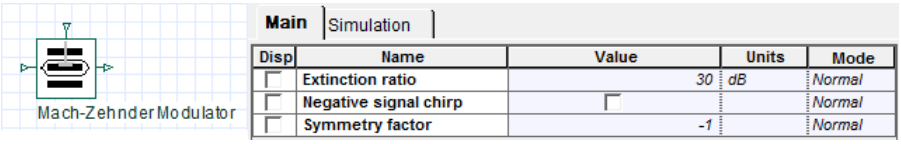


Figura 3.9: Configuración del MZM de un brazo

Para entender mejor el funcionamiento se describe el modelo matemático que se utiliza en el bloque modulador Mach-Zehnder de un solo brazo. Las ecuaciones que describen el comportamiento del MZM son:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot cos[\Delta\theta(t)] \cdot exp[j \cdot \Delta\phi(t)]$$

En donde $\Delta\theta$ es la diferencia de fase entre los dos brazos y se define como:

$$\Delta\theta(t) = \frac{\pi}{2} \cdot \{0{,}5 - ER \cdot [modulation(t) - 0{,}5]\}$$

en donde $ER = 1 - \frac{4}{\pi} \cdot arctan\left(\frac{1}{\sqrt{Ext_{rat}}}\right)$ y $\Delta\phi$ es el cambio de fase de la señal definido como:

$$\Delta\phi(t) = SC \cdot \Delta\theta(t) \cdot \frac{1 + SF}{1 - SF}$$

en donde el parámetro SC es -1 si hay chirp de la señal negativa, o 1 si no hay chirp de la señal negativa. Ext_{rat} es la relación de extinción, SF es el factor de simetría, y $modulation(t)$ es la señal eléctrica de entrada. La señal eléctrica de entrada es normalizada entre 0 y 1.

3.4. Canal óptico y sus características

Una vez obtenidos los datos a transmitir en el dominio eléctrico y modulados externamente mediante un MZM, con una portadora óptica, dicha señal obtenida finalmente se transmitirá a través de un canal óptico de comunicaciones que utilizará una fibra monomodo del tipo estándar, el cual, tiene las características descritas en el capítulo anterior, tales como atenuación, dispersión cromática, dispersión PMD entre otras.

Se procede a configurar las características de la fibra, basados en el estado del arte y en algunas fibras comerciales utilizadas actualmente. Primero se elige la longitud de onda a la cual se va a operar el enlace, la cual es 1550 nm, posteriormente se escoge una longitud del canal de 50 km y por último un coeficiente de atenuación de 0.2 dB/km como se muestra en la figura 3.10.

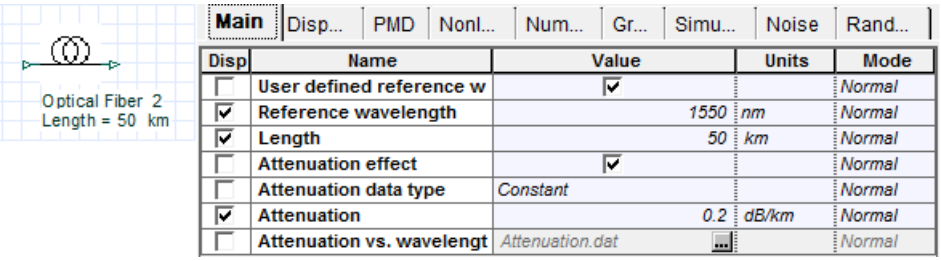


Figura 3.10: Parámetros básicos de la fibra óptica utilizada

De igual manera se configura el parámetro de dispersión como se muestra en la figura 3.11, en donde se selecciona la opción de la dispersión relacionada al retardo de grupo. Dicha dispersión comúnmente llamada dispersión cromática tiene unidades de $\frac{ps}{(nm \cdot km)}$, la cual también se puede describir mediante el parámetro β_2 el cual tiene unidades de $\frac{ps^2}{km}$ de la siguiente manera:

$$D = -\left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)\beta_2 \tag{3.3}$$

en donde c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda de operación. La fibra que se va a utilizar tiene un parámetro de $D = 18\frac{ps}{nm \cdot km}$, y como se puede despejar de la ecuación 3.3 se obtiene el parámetro de $\beta_2 = -23\frac{ps^2}{km}$.

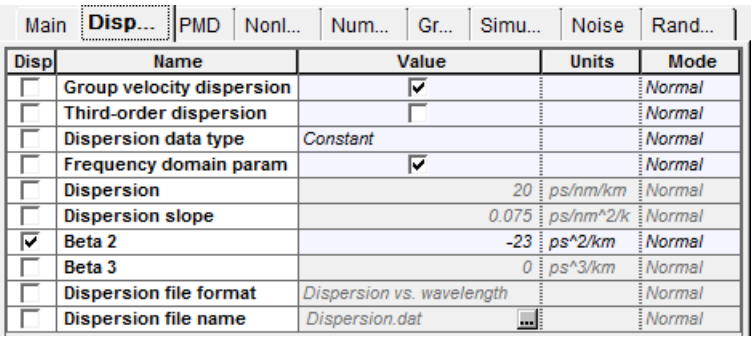


Figura 3.11: Parámetros relacionados a la dispersión de la fibra

3.5. Sistema de recepción y sus características

Para recibir la señal se seleccionó un fotodetector, un filtro pasa banda y un demodulador AM como se muestra en la figura 3.12.

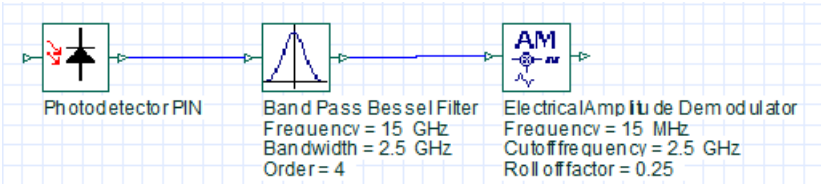


Figura 3.12: Bloques utilizados en el sistema de recepción

El fotodetector tiene las características mostradas en la figura 3.13, solamente se modificó el parámetro de responsividad de 1 A/W a 2 A/W con el fin de obtener una señal de mayor potencia a la salida del fotodetector y el muestreo de la señal de centró a la frecuencia portadora óptica la cual es de 193.41 THz.

Main | Downsampling | Noise | Random numbers

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Responsivity	2	A/W	Normal
☐	Dark current	10	nA	Normal

Main | Downsampling | Noise | Random numbers

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Centered at max power	☐		Normal
☐	Center frequency	193.41	THz	Normal
☐	Sample rate	5 * (Sample rate) S	Hz	Script

Figura 3.13: Parámetros del fotodetector

El filtro pasa banda (figura 3.14) se colocó únicamente para tener una idea de un modelo de recepción en donde sea posible recibir dos o más subportadoras, ya que para recibir solamente una subportadora se puede omitir este elemento. Dicho filtro pasa banda tiene una frecuencia central a la frecuencia subportadora, en este caso 15 GHz y se configuró un ancho de banda a -3dB de 2.5GHz. Se realizaron varias pruebas y al revisar el diagrama de ojo y el BER de la señal recibida se identificó que para esta aplicación es mejor utilizar un filtro Bessel, en comparación con un filtro de tipo Butterworth o Chebyshev. Finalmente se eligió un filtro de orden 4.

Main | Simulation

Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Frequency	15	GHz	Normal
☑	Bandwidth	2.5	GHz	Normal
☐	Insertion loss	0	dB	Normal
☐	Depth	100	dB	Normal
☐	Order	4		Normal

Figura 3.14: Parámetros del filtro pasa banda

Por último se configura el demodulador AM (figura 3.15), en donde se específica la frecuencia del oscilador, la cual permitirá obtener la información en banda base. Una vez obtenida la información en banda base se configura un filtro pasa bajas, en donde se puede determinar la frecuencia de corte a -3dB, la cual se escoge de 2.5 GHz y el

tipo de filtro utilizado con su factor de "roll-off" los cuales se determinan como filtro de tipo cosenoidal y un factor de "roll-off" de 0.25, estos valores del filtro pasa bajas se pueden modificar para determinar los cambios en la calidad de la señal.

Main | Low Pass Filter | Simulation

Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Frequency	15	GHz	Normal
☐	Phase	0	deg	Normal
☐	Gain	1		Normal

Main | Low Pass Filter | Simulation

Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Cutoff frequency	2.5	GHz	Normal
☐	Filter type	Cosine Roll Off		Normal
☑	Roll off factor	0.25		Normal

Figura 3.15: Parámetros del demodulador AM

El diagrama de ojo de la señal recibida se muestra en la figura 3.16

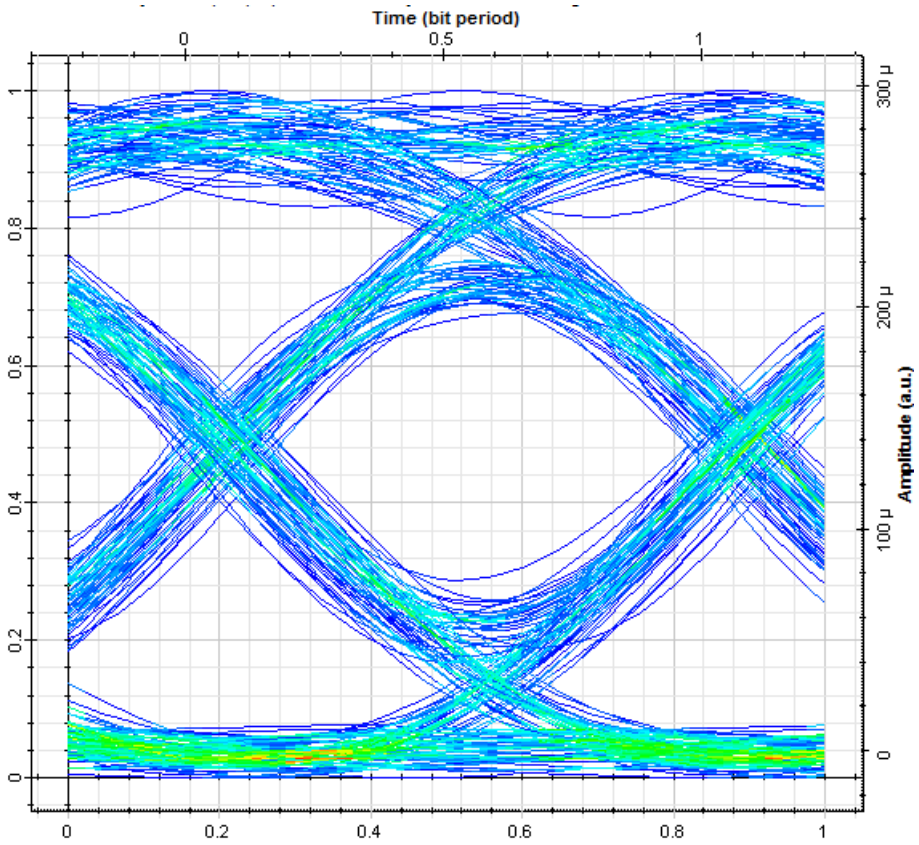


Figura 3.16: Diagrama de ojo de la señal recibida, distancia: 50 km, frecuencia subportadora: 15 GHz, ancho de banda de -3dB: 2.5 GHz, factor de "roll-off": 0.25.

3.6. Efecto de supresión de portadora

Uno de los mayores problemas de utilizar el método de recepción mostrado en la sección anterior es el fenómeno de supresión de portadora en donde cada una de las dos bandas laterales sufre un retardo diferente respecto a la portadora óptica. Al realizar el batido en detección, la amplitud resultante es la suma de las dos bandas, que depende del desfase relativo entre ellas. Si este desfase es de π radianes estamos ante una interferencia destructiva que anula la señal recibida [30]. La función de transferencia del efecto supresión de portadora depende de la distancia del enlace de fibra óptica, el parámetro de dispersión de la fibra y la frecuencia angular de la señal RF como se muestra en a ecuación 3.4

$$H_{RF}(\Omega) = cos\left(\frac{1}{2}\beta_2 L\Omega^2\right) \tag{3.4}$$

en donde el parámetro β_2 representa la dispersión de la fibra, L es la longitud de la fibra, y Ω es a frecuencia angular de la señal RF.

Con el fin de comprobar en el simulador el efecto de supresión de portadora cuando se detecta una señal mediante un fotodetector, se realizó un barrido de distancias del enlace de RoF en el software de simulación, desde 2 km hasta 50 km, y se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 3.17. Por otra parte en la misma figura se colocó la gráfica teórica del fenómeno de supresión de portadora.

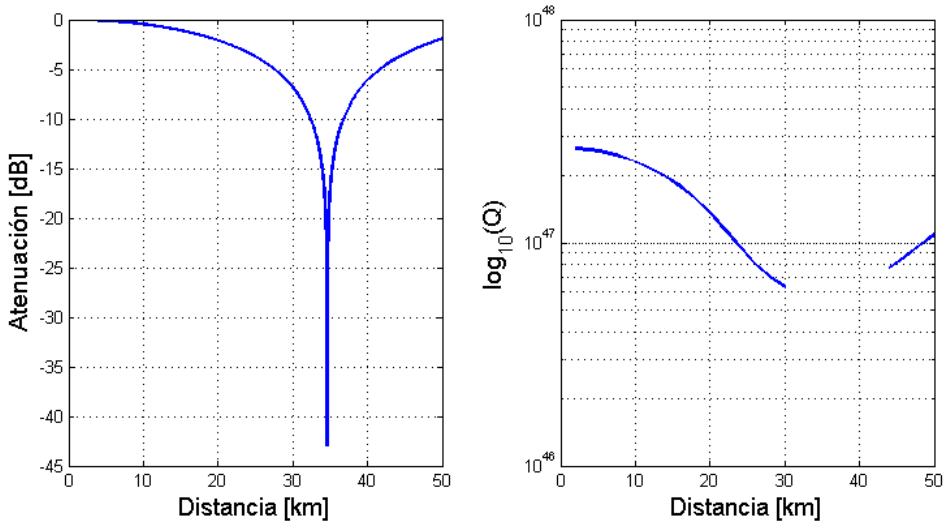


Figura 3.17: Resultados obtenidos para un enlace de RoF con una subportadora de 10 GHz. Izquierda: Gráfica de 10 $\log_{10}\left[cos\left(\frac{1}{2}\beta_2 L\Omega^2\right)\right]$. Derecha: Gráfica de los resultados obtenidos en simulación.

En la grafica de la derecha, se puede observar que hay una discontinuidad en la gráfica (desde 32 km hasta 42 km), debido a que el Factor Q obtenido es 0, por lo que por cuestiones matemáticas no se puede realizar una gráfica semilogarítmica no se puede. Es decir se comprueba que al trabajar en la frecuencia de 10 GHz, no se debería colocar el fotodetector a las distancias desde 32 km hasta 42 km ya que no se puede recuperar la señal.

Capítulo 4

Transmisión de dos subportadoras de RF

En este capítulo se explican dos diferentes métodos para generar una señal de Radio sobre Fibra, igualmente se identifican tres métodos de recepción, con el fin de obtener los resultados, comparar los dos métodos e identificar cual es el mejor, tanto en aspectos de calidad de señal como en términos de costo-beneficio. Primero se realizaron las pruebas con el primer método de generación y con el método de recepción de detección directa para evaluar aspectos de factor de caída y ancho de banda y como repercute la variación de estos parámetros en la calidad de la señal. Luego utilizando el mejor resultado de la prueba anterior, se comparó junto con los otros dos métodos de recepción para identificar con cual se obtiene una mejor calidad de la señal. Obteniendo el mejor método de recepción se procede a evaluar cual de los dos métodos de generación de la señal RoF es mejor, mediante la comparación de los resultados obtenidos.

Para transmitir varias subportadoras se pueden emplear varios métodos en este caso se utilizaron dos de ellos; en el primer método se generaron las dos subportadoras de RF como se vió en la sección 1 del capítulo 3, las cuales se sumaron en el dominio eléctrico, luego se utilizó un modulador Mach Zehnder, para transmitir la señal resultante de la suma de las dos subportadoras; en el segundo método se utilizan dos moduladores Mach Zehnder, en donde cada uno modula de manera óptica la señal subportadora correspondiente, luego las dos señales ópticas se acoplan para ser enviadas a través del enlace de fibra óptica.

Con el objetivo de obtener los resultados correspondientes y evaluar el factor BER, se implementan tres esquemas diferentes para la recuperación de la señal transmitida. El primer método es el de detección directa, es decir se divide la señal óptica recibida en dos, en cada uno de los extremos se coloca el sistema de recepción, el cual se compone de un fotodetector, un filtro pasa banda y un demodulador (explicado en la sección 5 del capítulo 3). El segundo método consta de filtrar las señales en el dominio óptico, mediante redes de difracción de Bragg seguido de un filtro óptico, finalmente se coloca el fotodetector para obtener los datos correspondientes. El tercer método consta en suprimir la portadora óptica mediante un filtro Notch, centrado en la frecuencia de portadora óptica, luego se divide la señal óptica como en el primer método y se coloca el fotodetector.

4.1. Primer método de generación de dos subportadoras

El método de generación de las dos subportadoras se basa en la generación de las subportadoras de manera separada, tal y como se explicó en el capítulo anterior, para posteriormente sumarlas en el dominio eléctrico tal como se muestra en la figura 4.1

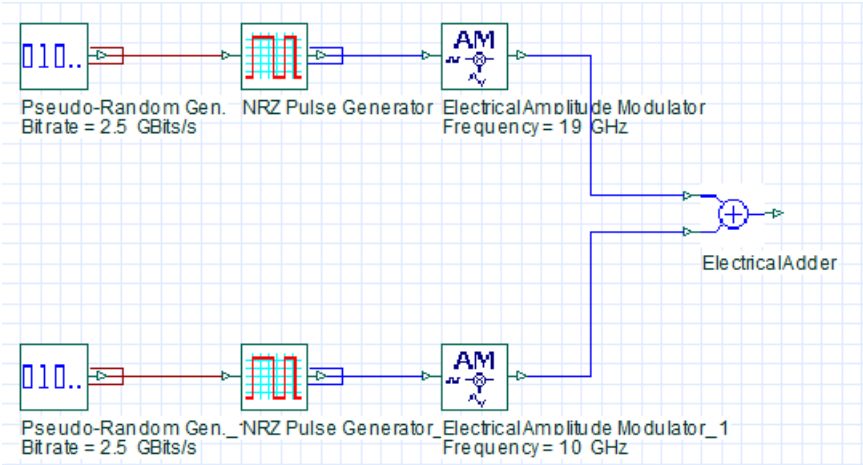


Figura 4.1: Método utilizado para la generación de dos subportadoras de RF mediante la suma de subportadoras

En pocas palabras el voltaje a la salida del sumador se define como se muestra en la ecuación 4.1, tomando como referencia la ecuación 3.2 y la configuración correspondiente.

$$V_{out} = V_{in1}(t)\ cos(2\pi 10 \times 10^9 t) + V_{in2}(t) cos(2\pi 19 \times 10^9 t) \tag{4.1}$$

en donde V_{in1} y V_{in2} son los datos que serán modulados por la portadora de 10 GHz y 19 GHz respectivamente.

Luego se utilizará el mismo generador láser detallado en el capítulo anterior el cual sera modulado por medio de un Mach Zehnder de doble brazo (solo se utilizará un brazo, pero se utilizó el de doble brazo con el objetivo de, en capítulos posteriores generar datos en banda base e introducirlos por el segundo brazo), por el momento se ingresará un valor DC, para no afectar la ecuación del modulador.

Para describir las características del dispositivo es importante conocer cual es la ecuación que lo modela, la cual se muestra en la ecuación 4.2, en donde se define el campo de salida, el cual depende de los parámetros a configurar.

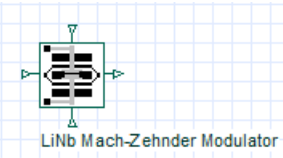
$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{10^{(I_L\ /\ 20)}} \left[\gamma \cdot e^{j\pi\left(\frac{V_2(t)}{V_{\pi RF}} + \frac{V_{bias2}(t)}{V_{\pi DC}}\right)} + (1-\gamma) \cdot e^{j\pi\left(\frac{V_1(t)}{V_{\pi RF}} + \frac{V_{bias1}(t)}{V_{\pi DC}}\right)} \right] \tag{4.2}$$

En donde $E_{in}(t)$ es la señal de entrada, V_1 y V_2 son los voltajes moduladores de RF en el dominio eléctrico , V_{bias1} y V_{bias2}, son los voltajes DC aplicados a el brazo 1 y el brazo 2 respectivamente, γ indica la relación de división de potencia hacia las dos guías de onda de cada brazo y esta dada por:

$$\gamma = \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}{2}$$

En donde $\varepsilon_r = 10^{Ext_{ratio}\,/\,10}$, V_{bias1} y V_{bias2}, son los voltajes DC de polarización, son incluidos de manera separada debido a la posibilidad de que el $V_{\pi DC}$ (Voltaje de polarización de conmutación) sea diferente de $V_{\pi RF}$ (Voltaje RF de conmutación). Si el voltaje de polarización de conmutación es igual al voltaje de RF de conmutación y el parámetro **Normalize Electrical Signal** es Falso, luego, el voltaje de polarización puede incluirse en la señal eléctrica.

Los parámetros utilizados en esta parte del proyecto se muestran en la figura 4.2.



Main | Modulator transfer function | Simulation

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Extinction ratio	20	dB	Normal
☐	Switching bias voltage	4	V	Normal
☐	Switching RF voltage	4	V	Normal
☐	Insertion loss	5	dB	Normal
☐	Normalize electrical signal	☑		Normal
☐	Modulation voltage1	2	V	Normal
☐	Modulation voltage2	-2	V	Normal
☐	Bias voltage1	0	V	Normal
☐	Bias voltage2	2	V	Normal

Figura 4.2: Parámetros del modulador Mach Zehnder de doble brazo

El canal óptico tiene las mismas características del capítulo anterior, en la parte de recepción se utiliza un divisor para obtener dos señales idénticas, con el fin de utilizar el sistema de recepción definido en el capítulo 3 (fotodetector, filtro pasabanda y demodulador), con el cual se recuperaran los datos, tal como se muestra en la figura 4.3

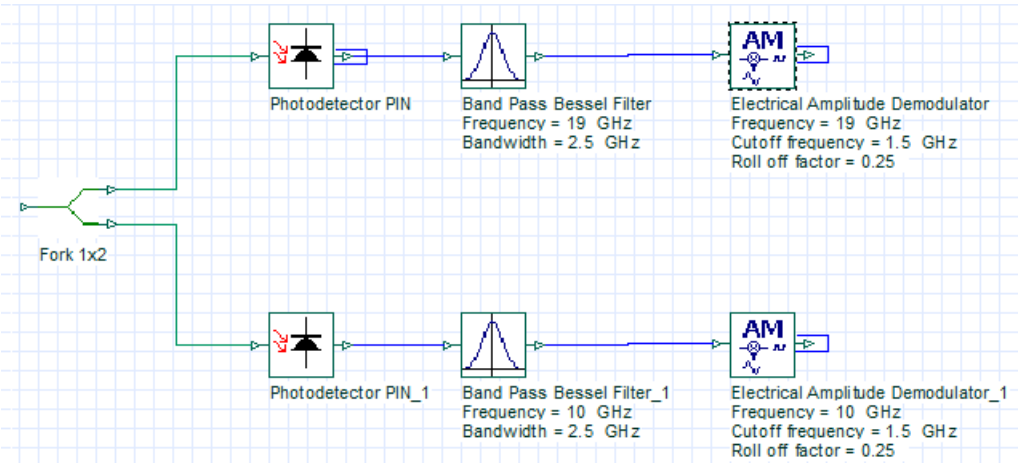


Figura 4.3: Sistema de recepción para recuperar las dos subportadoras

4.1.1. Recepción mediante el filtrado en el dominio eléctrico

Se evaluará la calidad de la señal recuperada variando los parámetros del filtro pasa bajas que contiene el demodulador (Ancho de banda de -3dB y factor de "roll-off" o factor de caída), con el fin de conocer cual es la mejor configuración para la comparación de los distintos esquemas de recepción que se van a realizar. Se realizaron las diferentes comparaciones entre las siguientes configuraciones de factor de caída y Ancho de banda a -3dB. Igualmente con el fin de evaluar la variación de los resultados conforme se varía la distancia del mismo, se realizó un barrido desde 2 km hasta 20 km con pasos de 2 km, obteniendo los respectivos valores de BER. Las combinaciones de Ancho de banda y factor de caída son las siguientes:

- Factor de caída: 0.25 y Ancho de Banda a -3dB: 1.5 GHz
- Factor de caída: 0.5 y Ancho de Banda a -3dB: 1.5 GHz
- Factor de caída: 1 y Ancho de Banda a -3dB: 1.5 GHz
- Factor de caída: 0.25 y Ancho de Banda a -3dB: 1.25 GHz
- Factor de caída: 0.25 y Ancho de Banda a -3dB: 1.75 GHz

Se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.4.

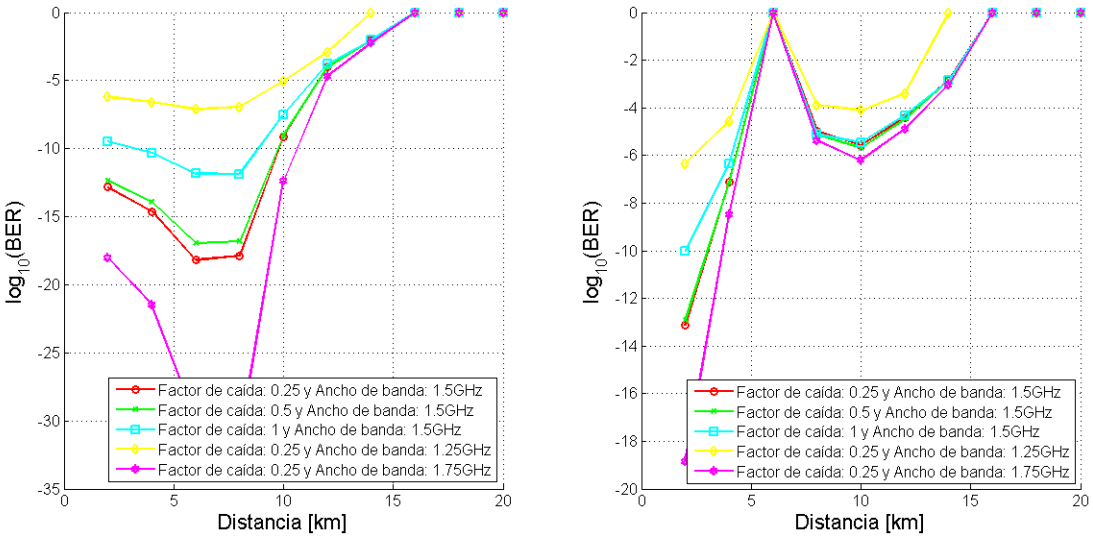


Figura 4.4: Resultados de los BER obtenidos variando los parámetros de factor de caída y ancho de banda a -3dB. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 19 GHz.

De las gráficas anteriores se determina que la mejor configuración del filtro pasa bajas es cuando se utiliza un factor de caída de 0.25 y un ancho de banda a -3dB de 1.75 GHz ya que en algunas distancias se consiguen valores de BER menores a 1×10^{-25}. Por otra parte se puede realizar la comparación cuando el ancho de banda se deja de 1.5 GHz y se varía el factor de caída de 0.25, 0.5 y 1, y se observa que los resultados son mejores cuando el factor de caída es de 0.25, pero que se pueden obtener resultados aceptables utilizando cualquier factor de caída, ya que los valores de BER son similares. Por lo que la combinación para realizar la comparación con los siguientes métodos es

utilizando una ancho de banda de 1.5 GHz y un factor de caída de 0.25.

Por otra parte se observa el fenómeno de la desaparición de la señal, cuando se utiliza el método de detección directa de la señal, en la recuperación de la subportadora de 10 GHz la señal desaparece en las distancias de 16 km, 18 km y 20 km; igualmente cuando se obtiene la señal transmitida y modulada por la subportadora de 19 GHz la señal desaparece en 6 km y en las distancias anteriormente mencionadas.

4.1.2. Recepción mediante el filtrado en el dominio óptico

Se evaluó otra manera de recibir los datos mediante el filtrado de la señal óptica en el dominio óptico por medio de redes de difracción de Bragg, se colocará un fotodetector el cual nos permitirá verificar los datos y obtener el diagrama de ojo de la señal, el esquema utilizado se muestra en la figura 4.5. Por otra parte, debido a las características de los componentes ópticos (filtros y redes de difracción de Bragg) se cambia las frecuencias de subportadora a 10 GHz y 30 GHz.

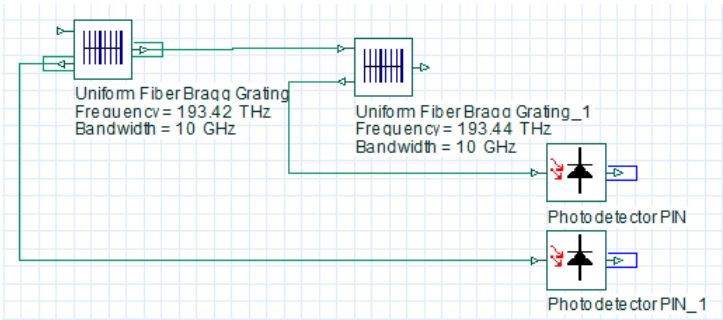


Figura 4.5: Esquema de simulación del filtrado en el dominio óptico mediante FBG

Este esquema funciona de la siguiente manera, primero se configura la primera red de difracción a la frecuencia de 193.42 THz en donde se encuentra ubicada la frecuencia de subportadora de 10 GHz (se filtra la banda lateral del lado derecho de la portadora óptica), la red de difracción 1, refleja la información ubicada en 193.42 THz y transmite la información restante, por ultimo se coloca un fotodetector para recuperar los datos modulados a la frecuencia de 10 GHz. La información que se transmite a través de la red de difracción 1 es llevada hacia la red de difracción 2 (esta red no es necesaria en este caso, pero se utilizó con el fin de mostrar el esquema que se debe utilizar si se necesitaran transmitir más de dos subportadoras de RF), la cual está configurada a la frecuencia de 193.44 THz lo que permite recuperar la información de la frecuencia subportadora de 30 GHz.

4.1.3. Recepción mediante la supresión de portadora óptica

Otro método para recuperar los datos transmitidos de RoF, es mediante la supresión de la portadora óptica, una vez hecho esto se emplea un filtro óptico para separar la banda lateral que se desea recuperar (en este caso dos filtros centrados en 193.42 THz y 193.44 THz, con un ancho de banda de 10 GHz y de 4° orden), finalmente se coloca un fotodetector para recuperar los datos transmitidos como se muestra en la figura

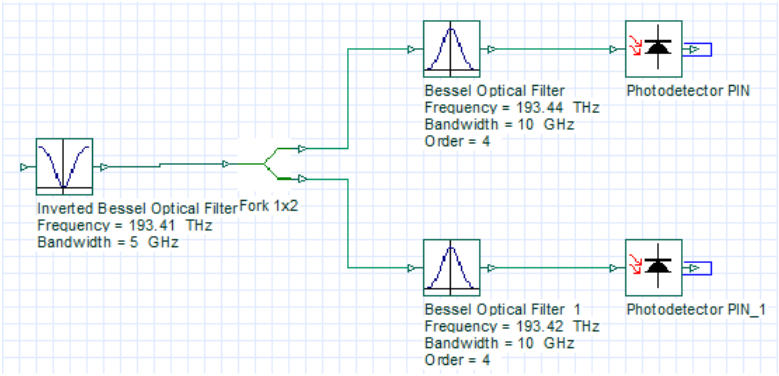


Figura 4.6: Esquema de simulación de la recepción de los datos mediante la supresión de la portadora óptica

4.1.4. Comparación de los tres métodos de recepción

Con el fin de no obtener demasiados datos que pueden ser innecesarios, se realiza la toma de los resultados de los tres métodos mencionados anteriormente, con el fin de obtener el mejor método de recepción, en donde se obtiene un BER aceptable, esto con el fin de comparar con el segundo método de generación mediante ese sistema de recepción.

Se realizó una prueba colocando un filtro después de la red de difracción de bragg, con el fin de mejorar la calidad, pero no se documentaron los resultados, ya que eran muy ideales y se obtenia un BER menor a 1×10^{-90}, por lo tanto no se podía comparar objetivamente ya que este método sería el mejor.

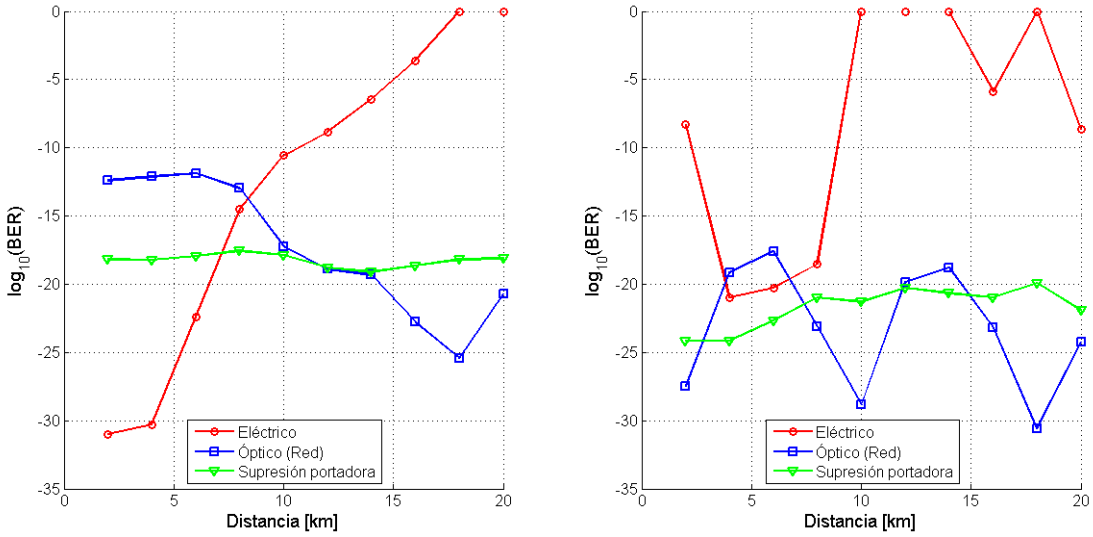


Figura 4.7: Comparación de los resultados obtenidos con los tres métodos de recepción utilizados. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz.

Por lo tanto se compararon los tres métodos mencionados anteriormente, el de recepción mediante la detección directa y el filtrado en el dominio eléctrico; el de recepción mediante el uso de las redes de difracción de bragg; y el método de supresión de portadora óptica, y el filtrado en el dominio óptico. Se obtuvieron los resultados de la figura 4.7.

Como se observa en la figura 4.7 y como se mencionó en la respectiva sección, los resultados obtenidos mediante la detección directa y posteriormente el filtrado en el dominio óptico, no son muy buenos ya que hay un desfase entre todas las bandas laterales transmitidas, es por eso que en algunas distancias no se pueden recuperar los datos transmitidos.

Por otra parte se observan mejores resultados cuando se filtra la información en el dominio óptico, tanto cuando se utilizan redes de difracción de bragg, como cuando se utilizan filtros ópticos. Para comprobar que esta afirmación es cierta se realizaron las mediciones de la interferencia entre simbolos (ISI, intersymbol interference) en donde se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.8

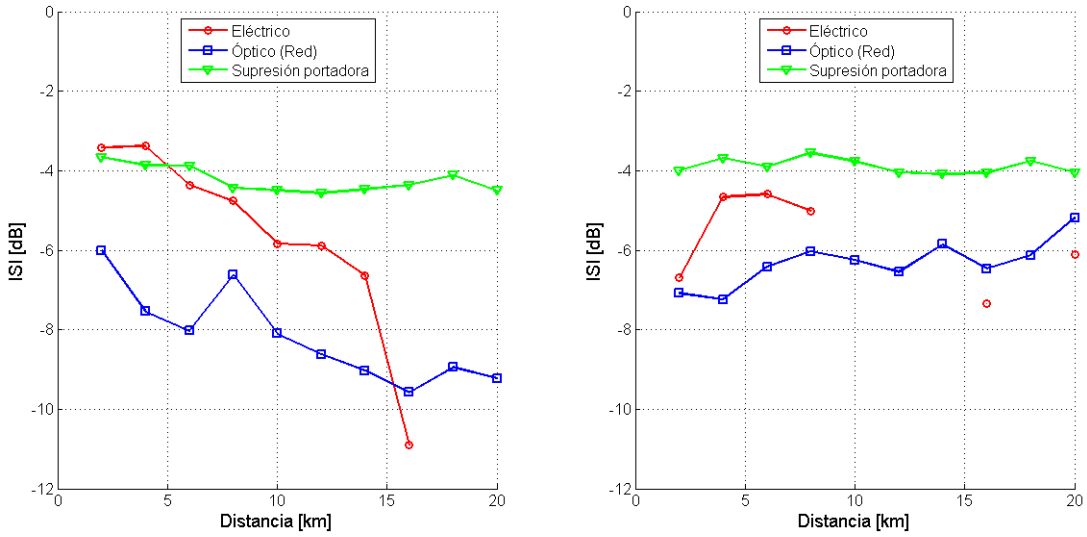


Figura 4.8: Comparación de los resultados obtenidos con los tres métodos de recepción utilizados. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz.

De la figura 4.8 se puede observar que comparando los dos métodos de detección en el dominio óptico, se obtienen mejores resultados cuando se recupera la información con el método de Supresión de portadora óptica en donde se obtienen valores de aproximadamente -4 dB. Para el otro método se puede observar que los valores de ISI varían desde -9 dB hasta -5 dB aproximadamente tomando en cuenta las dos gráficas. Igualmente se observa que hay discontinuidades cuando se grafican los datos cuando se recibe de manera directa, ya que no se puede calcular el valor de ISI.

4.2. Segundo método de generación de dos subportadoras

En la sección anterior se utilizó un modulador Mach Zehnder, y se generaron las dos subportadoras mediante la suma de las mismas en el dominio eléctrico. En esta sección se utilizarán dos moduladores Mach Zehnder, en donde cada uno modulará una subportadora diferente, luego las dos señales ópticas que se obtienen de cada uno de los moduladores se acoplaran y se transmitirán a través del canal de fibra óptica, tal y como se muestra en la figura 4.9.

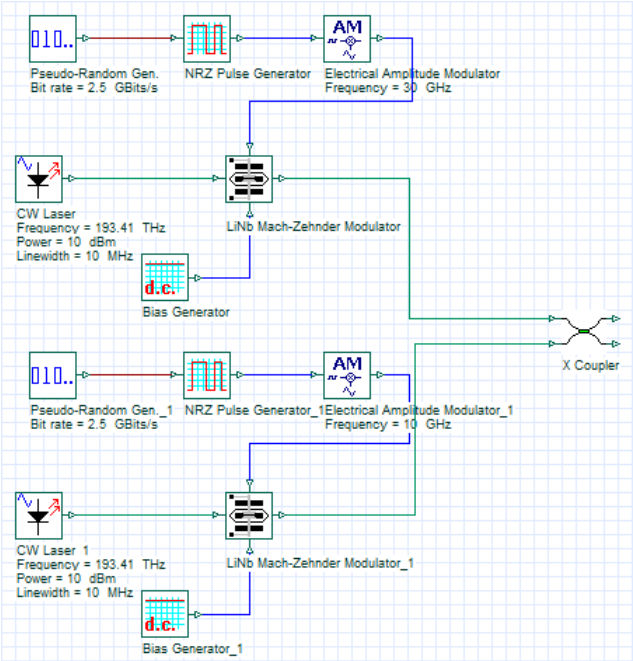


Figura 4.9: Método de generación dos subportadoras mediante dos MZM y el acoplamiento de las señales

El inconveniente de utilizar este método de generación es que no se puede utilizar el método de recepción en el dominio eléctrico, ya que al acoplar dos señales que contienen la misma portadora óptica hay un problema al recuperar los datos correctamente. Para intentar resolver este problema se suprimió una de las portadoras ópticas, pero esta solución funcionaba únicamente para los datos con la portadora que no se suprimía. Se intentó suprimir las dos subportadoras, pero de esta manera no se podía recuperar ninguno de los datos transmitidos, por lo que no se puede utilizar el método de recepción de detección directa, con el método de generación utilizando dos MZM en paralelo.

Como se mencionó en la sección anterior la mejor manera de recuperar los datos es mediante el dominio óptico por lo tanto se realizó el mismo barrido de las distintas distancias del enlace, de 2 km hasta 20 km, y utilizando los métodos de recepción en el dominio óptico (supresión de portadora óptica y filtrado mediante FBG's). Los resultados se muestran en la figura 4.10.

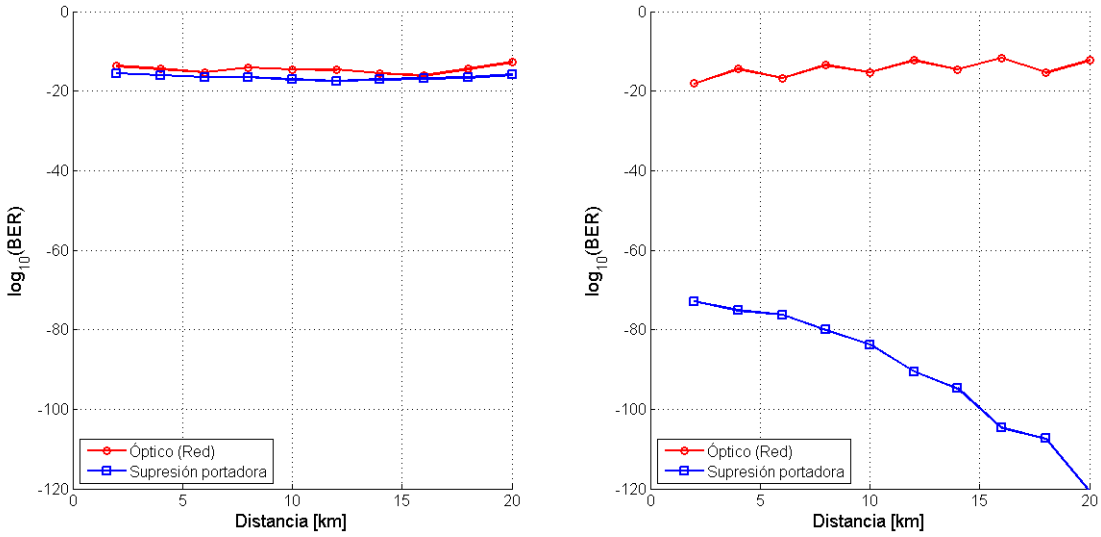


Figura 4.10: Comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos de recepción utilizados. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz.

En la figura anterior se observa que para la frecuencia de 30 GHz, y utilizando el método de supresión de portadora se obtienen resultados casi que ideales con valores de BER menores a (1×10^{-70}).

4.3. Comparación de los dos métodos de generación

Se compararán los dos métodos de generación utilizados, se colocarán en una misma gráfica los resultados obtenidos con los dos métodos de recepción óptica, ya que fueron los mejores resultados. Cabe resaltar que se obviará el resultado obtenido con 2 MZM para la frecuencia de subportadora de 30 GHz, ya que es un resultado que es casi ideal, y no proporciona mucha información.

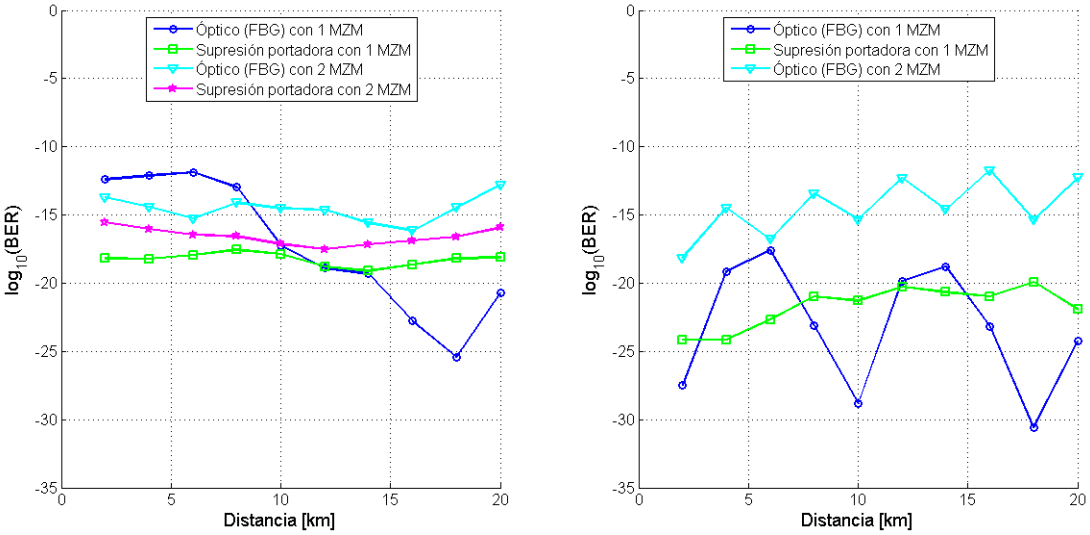


Figura 4.11: Comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos de transmisión y los métodos de recepción. Izquierda: Frecuencia subportadora de 10 GHz. Derecha: Frecuencia subportadora de 30 GHz.

Como se mencionó anteriormente el resultado que se vió en la gráfica derecha de la figura 4.10, el utilizar el método de recepción de supresión de portadora, y en la frecuencia de 30 GHz son resultados muy buenos, casi que ideales, por lo que se puede deducir que se obtiene mejores resultados cuando se utiliza el método de generación con dos MZM y acoplando la señal en el dominio óptico. Por otra parte como son resultados tan ideales se comparan como se muestra en la figura 4.11, y se puede concluir que no importa que método de generación se utilice se obtienen muy buenos resultados (con un BER menor a 1×10^{-12}, como se asume en el estado del arte de las transmisiones ópticas), puesto que se escoge la solución mas costo-eficiente de las dos. Los métodos se diferencian entre si, en que el primer método utiliza un sumador de señales eléctricas adicional, mientras que el segundo método utiliza otro MZM, otro Láser, y una acoplador óptico, puesto que *la mejor opción para generar una señal de RoF con dos subportadoras es sumando los datos modulados en RF*, para posteriormente modular el láser de manera externa.

Capítulo 5

Transmisión de tres subportadoras de RF

En este capítulo se realiza la simulación de la generación, transmisión y recepción de un sistema de radio sobre fibra que consta de tres subportadoras de RF. Se explica detalladamente el método de generación por medio de la suma en el dominio eléctrico de todas las subportadoras, el método de recepción por medio del filtrado de las señales en el dominio óptico mediante redes de difracción de Bragg. Se tomaron los respectivos resultados, de los valores de BER e ISI de cada una de las tres subportadoras y con el objetivo de comparar resultados se modificó la distancia y se realizó un barrido de 2 km hasta 20 km en pasos de 2 km, como se realizó en el capítulo anterior. Se realizaron las respectivas comparaciones de las señales subportadoras y se obtuvieron las conclusiones sobre la afectación de las señales recibidas cuando se transmite una tercera subportadora.

Para la comparación de los resultados obtenidos cuando se transmiten dos subportadoras, con los resultados que se obtienen tres subportadoras, se eligen las dos frecuencias trabajadas en el capítulo anterior (10 GHz y 30 GHz), y adicionalmente se transmite una subportadora en la frecuencia de 20 GHz, esto con el fin de observar que tanto se modifica las señales de 10 y 30 GHz obtenidas en el capítulo anterior.

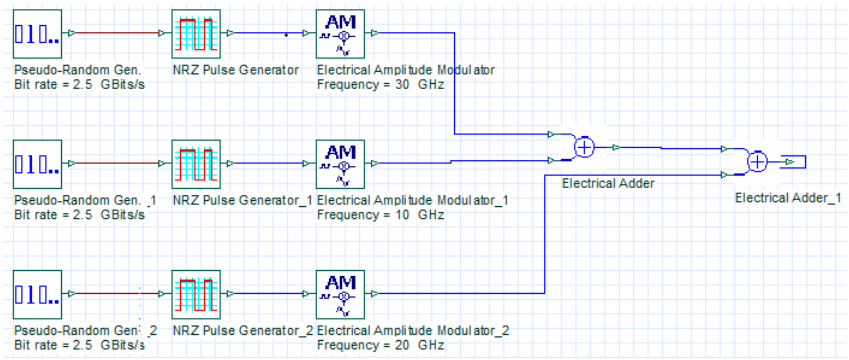


Figura 5.1: Método de generación de tres subportadoras de RF

El método de generación utilizado fué el que se concluyó que era el mejor método a utilizar cuando se transmitieron las dos subportadoras, en donde se suman las subportadoras de RF en el dominio eléctrico y una vez obtenidos los datos, se modula el láser de manera externa mediante un modulador Mach Zehnder (como se observa en la figura

5.1) y se realiza el mismo procedimiento de transmisión utilizado en el capítulo anterior.

Para el método de recepción y con el fin de comparar los datos se escogió el método de filtrado mediante tres redes de difracción de Bragg, en donde cada una se encarga de reflejar la frecuencia de cada una de las subportadoras de RF las cuales están moduladas por 10, 20 y 30 GHz, lo que corresponde a 193.42, 193.43 y 193.44 THz respectivamente como se puede observar en la figura 5.2.

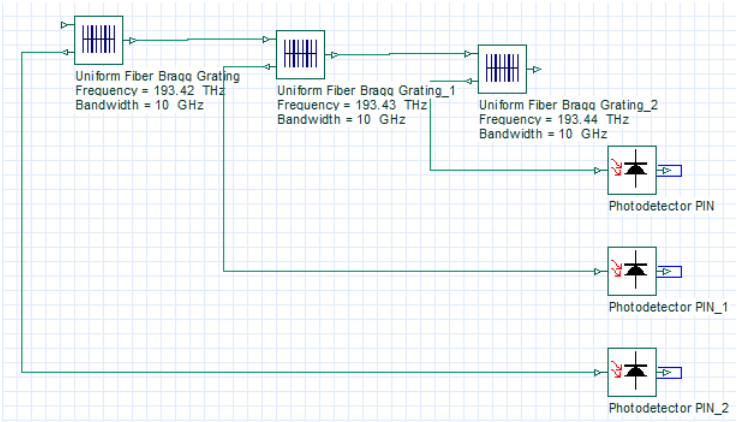


Figura 5.2: Método de recepción de tres subportadoras de RF

Se tomaron los valores de BER e ISI los cuales se muestran en la figura 5.3.

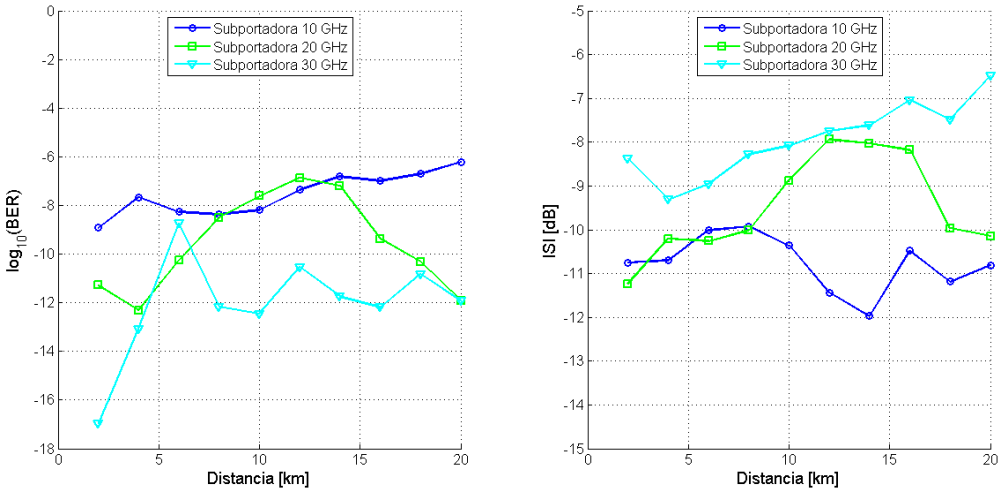


Figura 5.3: Resultados obtenidos a la salida del sistema de transmisión de 3 subportadoras de RF. Izquierda: Bit Error Rate. Derecha: Interferencia entre simbolos

De la figura anterior se puede deducir que la señal que se transmite en la frecuencia de 10 GHz es la de peor calidad en donde su BER mínimo es aproximadamente 1×10^{-9} y se obtienen valores de ISI de hasta -12 dB. Por otra parte se observa que la señal de mayor calidad en comparación con las otras dos transmitidas es la de 30 GHz en donde se llega a obtener un valor de BER de hasta 1×10^{-17} y en promedio se obtiene un BER de 1×10^{-12}.

Ahora con el fin de observar como se modifican las señales obtenidas en el capítulo anterior, se comparan con los resultados obtenidos para las frecuencias de 10 y 30 GHz detalladas en la figura 5.3, dichas comparaciones de los valores de BER e ISI, se muestran en las figuras 5.4 y 5.5 respectivamente.

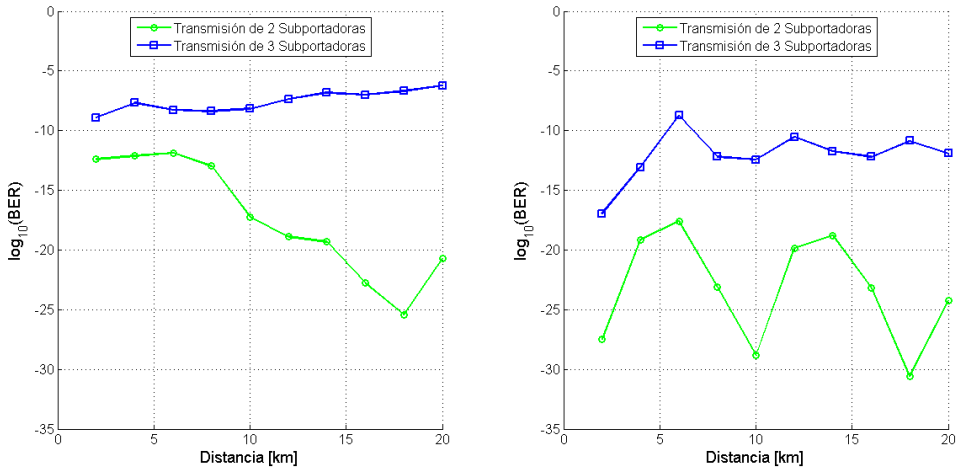


Figura 5.4: Comparación de los resultados de BER de la transmisión de dos subportadoras y la transmisión tres subportadoras. Izquierda: Subportadora de 10 GHz. Derecha: Subportadora de 30 GHz

De la figura 5.4 se puede evidenciar que tanto para la frecuencia de subportadora de 10 GHz como para la de 30 GHz hay una reducción en el valor del BER cuando se transmiten tres subportadoras en comparación a cuando se transmiten dos subportadoras. Para la frecuencia de subportadora de 10 GHz se observa que el valor de BER es menor a 1×10^{-10} y que en promedio se obtiene un valor de BER de 1×10^{-8}. Por otra parte, para la frecuencia de subportadora de 30 GHz se observa que en promedio se puede obtener un valor de BER de 1×10^{-12} lo que se encuentra dentro del estado del arte de las comunicaciones ópticas.

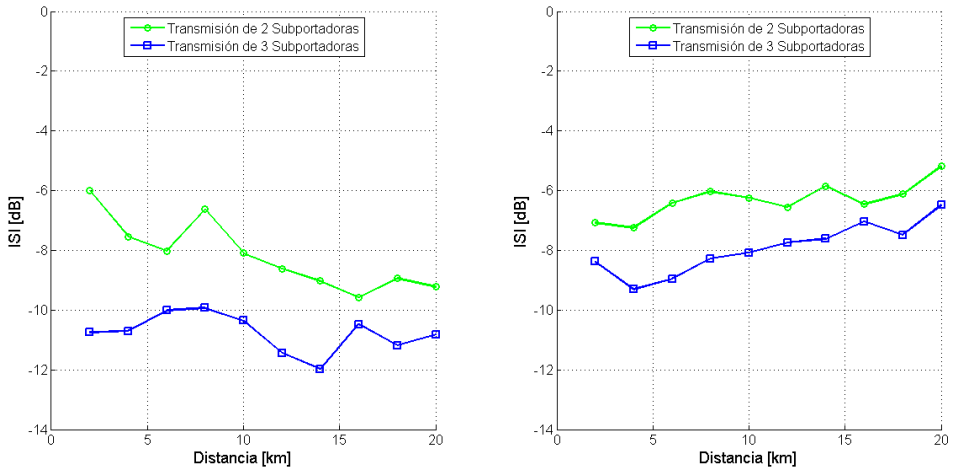


Figura 5.5: Comparación de los resultados de ISI de la transmisión de dos subportadoras y la transmisión tres subportadoras. Izquierda: Subportadora de 10 GHz. Derecha: Subportadora de 30 GHz

De la figura 5.5 se puede corroborar lo dicho anteriormente, en donde se mencionaba que se reduce la calidad de las señales transmitidas cuando se añade una subportadora. Se puede evidenciar que para la frecuencia subportadora de 10 GHz el valor de ISI es menor a -10 dB cuando se transmiten tres subportadoras, cuando se transmiten dos el valor mínimo no alcanza este valor. Para la frecuencia de 30 GHz ocurre algo similar, ya que cuando se transmiten dos subportadoras el ISI mínimo se encuentra aproximadamente en -7dB, mientras que cuando se transmiten tres subportadoras, el valor de ISI mínimo es de -9dB aproximadamente.

Capítulo 6

Transmisión de tres señales RF y banda base

En este capítulo se añade una señal de la información en banda base a las tres subportadoras de RF que se tienen en el capítulo anterior, se explica detalladamente el método de generación de las señales e igualmente se explica el método de recepción de las señales. Se realiza un barrido de la distancia del enlace desde 2 km hasta 20 km en pasos de 2 km, se obtuvieron los respectivos datos de BER e ISI con el fin de comparar las señales de radiofrecuencia cuando se agrega la señal en banda base. Se realiza el respectivo análisis de la comparación. Por último se obtienen los datos de BER e ISI de la señal transmitida y recibida en banda base, se realiza el análisis de los resultados obtenidos y se obtienen las conclusiones del sistema de transmisión obtenido.

Para la generación de la señal de datos modulada en radiofrecuencia junto con la información en banda base se utilizó el mismo método que en los capítulos anteriores en donde se suman todas las señales en el dominio óptico con el fin de posteriormente modular el láser externamente. Para las frecuencias de subportadoras se escogen las mismas que en el capítulo anterior(10 GHz, 20 GHz y 30 GHz), para posteriormente realizar la comparación de las señales cuando se agrega una señal en banda base, esta señal en banda base se tomó con una velocidad de transmisión de 5 Gbps, con una modulación NRZ, luego se obtiene una señal con un ancho de banda de 5 GHz. El diagrama de generación de las señales se muestra en la figura 6.1.

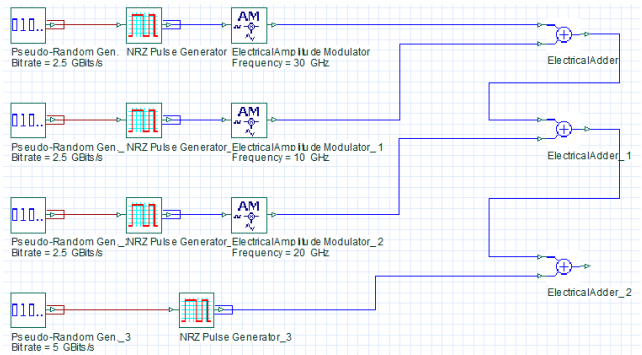


Figura 6.1: Método de generación de tres subportadoras de RF e información en banda base

Una vez obtenida la señal en el dominio eléctrico, se modula el láser de manera

externa por medio de un modulador Mach Zehnder, para obtener una señal óptica con toda la información que se esta transmitiendo, se transmite a través del canal óptico con una atenuación (0.2 dB/km) y una dispersión ($18\frac{ps}{nm \cdot km}$) y por último se utiliza el método de recepción de las señales del capítulo anterior, en donde se utilizan 4 redes de difracción de Bragg en serie, y en donde cada una se encuentra centrada a la frecuencia de subportadora correspondiente a banda base, 10 GHz, 20 GHz y 30 GHz, que desplazadas en el dominio óptico de encuentran en 193.41 THz, 193.42 THz, 193.43 THz y 193.44 THz respectivamente. Finalmente se coloca un fotodetector para obtener la señal en el dominio eléctrico y obetener un diagrama de ojo de la señal obtenida. El método de recepción se muestra en la figura 6.2.

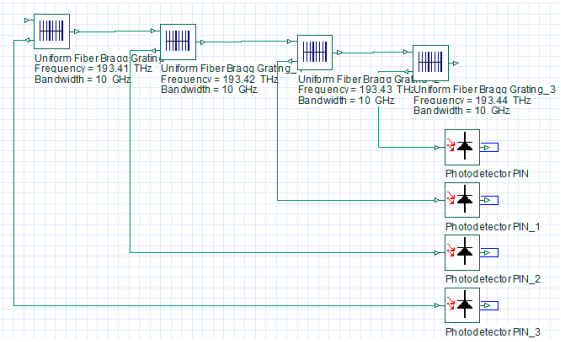


Figura 6.2: Método de recepción de tres subportadoras de RF e información en banda base

Se realiza un barrido en distancia desde 2 km hasta 20 km, en pasos de 2 km para realizar la toma de resultados tanto de BER como de ISI de la señal de salida y compararlos con los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Se toma la distancia máxima de 20 km ya que es la longitud máxima promedio que tiene una ciudad en donde podría funcionar un sistema de radio sobre fibra. Los resultados se muestran en las figuras 6.3 y 6.4.

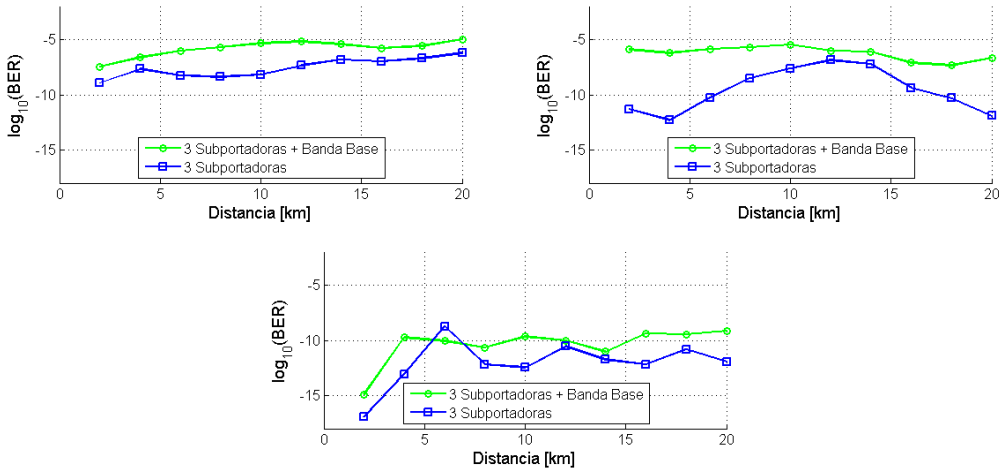


Figura 6.3: Comparación de los resultados de BER de la transmisión de tres subportadoras y la transmisión tres subportadoras junto con banda base. Izquierda-Arriba: Subportadora de 10 GHz. Derecha-Arriba: Subportadora de 20 GHz. Centro-Abajo: Subportadora de 30 GHz.

De las gráficas de la figura 6.3 se puede evidenciar y corroborar lo dicho en el capítulo anterior, cuando se transmiten tres subportadoras junto con banda base, se reduce la calidad de la señal en la mayoría de los resultados, excepto en la frecuencia de 30 GHz en donde en la distancia de 6 km se obtiene un valor mayor. En los datos modulados a frecuencias de 10 y 20 GHz se obtienen valores de BER entre 1×10^{-5} y 1×10^{-7} aproximadamente, y los datos modulados a la frecuencia de 30 GHz, se obtienen valores alrededor de 1×10^{-10}, con lo cual no es la mejor calidad de la señal pero se puede recuperar satisfactoriamente.

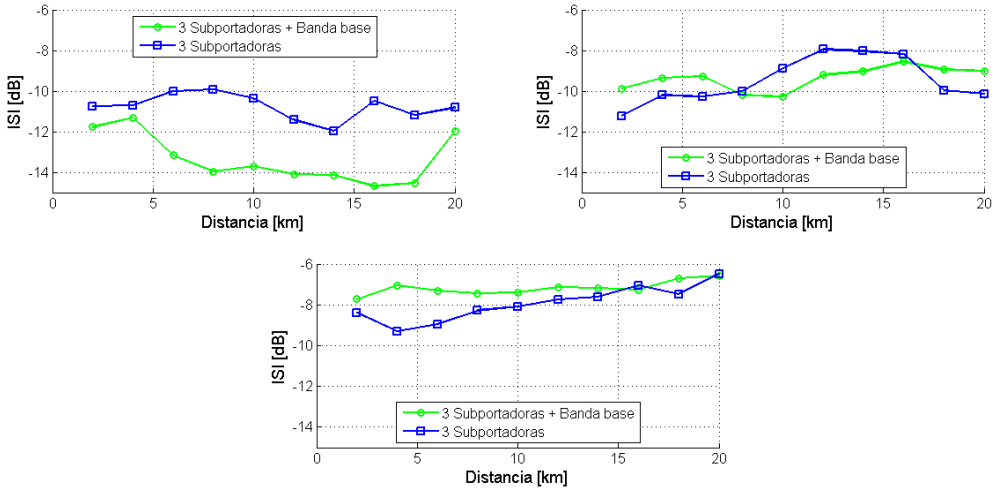


Figura 6.4: Comparación de los resultados de ISI de la transmisión de tres subportadoras y la transmisión tres subportadoras junto con banda base. Izquierda-Arriba: Subportadora de 10 GHz. Derecha-Arriba: Subportadora de 20 GHz. Abajo: Subportadora de 30 GHz.

Con respecto a los resultados obtenidos de la interferencia entre símbolos ISI, se comprueba de manera parcial, las medidas tomadas del BER, en la frecuencia de 10 GHz se reduce considerablemente de hasta -14 dB. Con respecto a las otras dos frecuencias de subportadora se observa que toman valores muy parecidos, que aunque mejore se mantienen en el mismo rango, es decir, para la frecuencia de 20 GHz las medidas de ISI se encuentran entre -8 dB y -10 dB; para la frecuencia de 30 GHz las medidas se encuentran entre -7 dB y -9 dB aproximadamente. Por lo tanto algunas medidas del ISI mejoran, pero no de una manera notable.

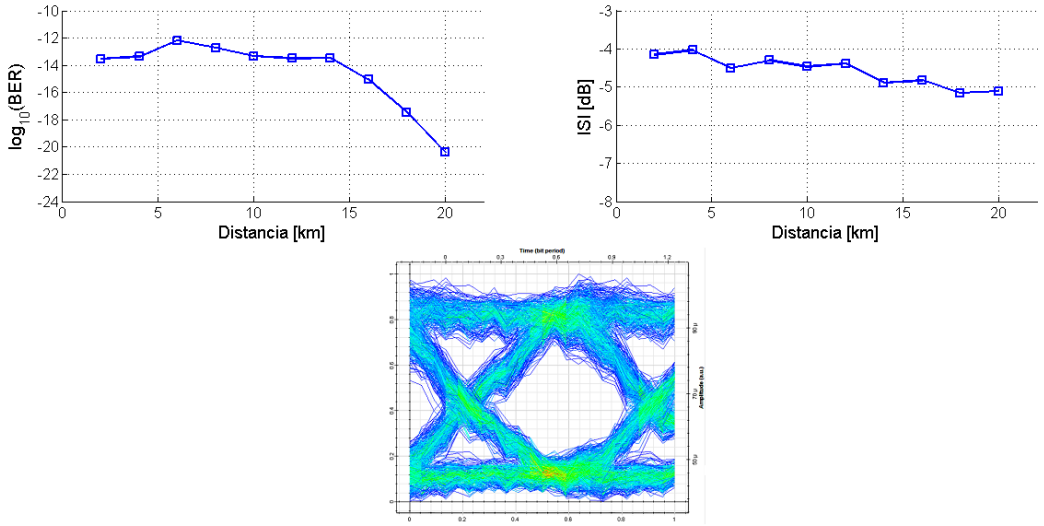


Figura 6.5: Resultados obtenidos de la señal transmitida en banda base. Izquierda-Arriba: Resultados del BER. Derecha-Arriba: Resultados del ISI. Abajo: Diagrama de ojo a una distancia de 20 km

Con respecto a la información transmitida en banda base se realizaron las mediciones de BER e ISI en donde se obtienen mejores resultados comparados con los que se obtienen de las señales moduladas en radiofrecuencia. Dichos resultados se muestran en la figura 6.5. De la figura se puede observar que se obtienen valores de BER menores a 1×10^{-12} llegando hasta 1×10^{-20} aproximadamente, por otra parte se observa que se obtiene una interferencia entre símbolos en el rango de -4 dB a -5 dB los cuales son valores que son mejores comparados a los resultados obtenidos modulando en radiofrecuencia. Dicha mejoría entre los datos modulados en radiofrecuencia y los datos transmitidos en banda base se debe a el nivel de potencia de la portadora en el dominio óptico, en donde la portadora de 193.41 THz (banda base) obtiene una potencia de -10 dBm, mientras que las subportadoras de RF tienen una potencia de -30 dBm.

Capítulo 7

Conclusiones

- Durante el diseño del sistema de generación de un sistema de Radio sobre fibra, que transmita múltiples subportadoras de RF y banda base, se encontraron varios métodos para la detección de las respectivas señales, específicamente tres métodos, primero la detección directa de la señal óptica mediante un fotodetector y el posterior filtrado de la señal en el dominio eléctrico, segundo la detección mediante el filtrado de las señales utilizando redes de difracción de Bragg, y tercero la recuperación de las señales mediante la supresión de la portadora óptica y utilizando filtros ópticos. En donde se encontró que es mejor filtrar y recuperar la señal en el dominio óptico, ya que en el dominio eléctrico al realizar la detección directa, en algunas ocasiones no se puede detectar la señal, mientras que en el dominio óptico no se tiene dicho problema.

- Igualmente se observó que realizar la detección en el dominio eléctrico tiene sus ventajas comparado con el dominio óptico. Cuando se detecta en el dominio óptico no se pueden transmitir múltiples subportadoras separadas de manera tal que se reduzca ancho de banda, esto debido a la dificultad de encontrar los dispositivos ópticos que cuenten con la capacidad de realizar esta tarea (el estado del arte de ancho de banda de filtros ópticos es de 10 GHz). Por consiguiente en el dominio eléctrico se pueden transmitir datos de manera tal que se optimice el ancho de banda disponible, mientras que si el objetivo es transmitir datos con la mejor calidad posible, lo ideal seria recibir los datos en el dominio eléctrico.

- Se evaluaron dos métodos de generación de la señal de radio sobre fibra, primero sumando las subportadoras de RF en el dominio eléctrico y utilizando un MZM (modulador Mach-Zehnder), y segundo utilizando dos MZM y luego acoplando las señales en el dominio óptico. Se observó que la diferencia entre los dos métodos es mínima, no importa cual de los dos métodos se escoja, se obtienen resultados dentro del estado del arte de las comunicaciones ópticas, por consiguiente para elegir el mejor método se procedería a evaluar el factor del costo-beneficion de cada uno de los métodos de transmisión.

- A medida que se van añadiendo y transmitiendo subportadoras y banda base se observa que las señales van reduciendo su calidad como se puede comprobar con los valores de BER obtenidos, esto debido a la interferencia de las señales entre sí, igualmente debido a la ineficiencia de los filtros utilizados (sean FBG o sean filtros ópticos) ya que no alcanzan a filtrar correctamente la banda requerida, y finalmente al detectar los datos se puede comprobar a través del diagrama de ojo que se dejan espurias de las otras bandas laterales transmitidas.

Bibliografía

[1] Negocios de Seguridad (2010). Cable de par trenzado. *Negocios de Seguridad* (52) Recuperado de:http://www.rnds.com.ar/articulos/052/RNDS_136W.pdf 136-148

[2] Universidad de Oviedo *Tema 2: La capa física* Recuperado de:http://www.isa.uniovi.es/docencia/redes/Apuntes/tema2.pdf

[3] Villareal Jimenez L. R. (1997) *Sistemas de comunicación a través de fibras ópticas*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado de: http://eprints.uanl.mx/579/1/1020119046.PDF

[4] William Stallings. (2004). *Comunicaciones y redes de computadores*. Madrid: Pearson Education.

[5] Andrew Tanembaum, David Wetherall. (2012). *Redes de computadoras*. México: Pearson Educación.

[6] Fiber To The Home Council Americas. (2010). *What is FTTH?*. 01 de Febrero de 2017, de Fiber To The Home Council Americas. Recuperado de: http://www.ftthcouncil.org/p/cm/ld/fid=25

[7] Marchukov Yaroslav(2011) *Desarrollo de una aplicación gráfica para el diseño de infraestructuras FTTH*, [En línea][Fecha de referencia: 5 de Junio de 2017]. Recuperado de: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13413/memoria.pdf?sequence=1

[8] Merrriam-Webster *Definition of radio frequency*, [En linea], [Fecha de referencia: 2 de Febrero de 2017]. Recuperado de: https://www.merriam-webster.com/dictionary/radio%20frequency

[9] Hong Bong Kim (2005) *Radio over Fiber based Network Architecture*. Technischen Universitat¨ Berlin. Recuperado de: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.138.7628&rep=rep1&type=pdf

[10] ANE, Agencia Nacional del Espectro *Cuadro Nacional de Artibución de Bandas de Frecuencias*, [En Línea], [Fecha de referencia: 5 de Junio de 2017]. Recuperado de: http://cnabf.ane.gov.co

[11] Cisco Systems. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2010.*, [En línea], [Fecha de referencia: 31 de Julio de 2016], Recuperado de: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf

[12] Cisco Systems *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*, [En línea], [Fecha de referencia: 15 de Junio de 2016]. Recuperado de: `http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf`

[13] Jyotsana S., Arvind Kumar J., Mukesh K.. *Analyzing Integrated Fiber-To-The-Home And Radio-Over-Fiber System* International Journal of Engineering Research & Technology, Volumen 2 (Número 6), junio 2013.

[14] Capmany Jose(2006) *Redes Ópticas*. España: Universidad Politecnica de Valencia: Servicio de publicación.

[15] Universidad Nacional Autonóma de México. *Transmisión de datos por RF*. Recuperado de: `http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/701/A7.pdf?sequence=7`

[16] Hamed Al-Raweshidy(2002). *Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks*. Boston: Artech House

[17] Muñoz Ortiz R.O., Cely Mancipe M.A., Puerto Leguizamón G.A., Suárez Fajardo C.A. *Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica.* Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 4), octubre-diciembre 2015: 585-598.

[18] Haoshuo Chen, Rujian Lin, Jiajun Ye. *Millimeter-Wave Radio over Fiber System for Broadband Wireless Communication, Microwave and Millimeter Wave Technologies Modern UWB antennas and equipment*

[19] Sanchis Kilders E., Ejea Martí J. B.(2008) *El diodo de emisión de luz LED*. Recuperado de: `http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T3.pdf`

[20] Sanchis Kilders E., Ejea Martí J. B.(2008) *El diodo láser*. Recuperado de: `http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T4.pdf`

[21] Sanchis Kilders E., Ejea Martí J. B.(2008) *Dispositivos de visualización y modulación*. Recuperado de: `http://www.uv.es/=esanchis/cef/pdf/Temas/B_T5.pdf`

[22] Sanchis Kilders E., Ejea Martí J. B.(2008) *Propagación de la luz en guías de onda*. Recuperado de: `http://www.uv.es/=esanchis/cef/pdf/Temas/B_T1.pdf`

[23] Pinto García R. A., Cabezas A. F.(2014) *Sistemas de Comunicaciones Ópticas (Monografía)* Bogota: Universidad Mílitar Nueva Granada

[24] De Jáuregui Ruiz I. F.(2010) *Estudio de sistemas ópticos WDM para su implantación en redes de alta velocidad* Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México

[25] García Argos C.(2009)*LED's y LD's en Comunicaciones Ópticas* Recuperado de: `http://garciaargos.com/descargas/apuntes/5curso/ComunicacionesOpticas2/LEDs%20y%20LDs%20parte%201.pdf`

[26] Dutton, H. J. (1998). *Understanding optical communications*. New Jersey: Prentice Hall PTR.

[27] Binh, L. N. (2014).*Optical fiber communication systems with Matlab and Simulink models.* CRC Press

[28] López Perafán J. G., Toledo Tovar A., Ordóñez H., Agredo J. P. *Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM* Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, volumen XX (número 31), Julio-Diciembre de 2011: 23-35

[29] Corning (2014) *Corning SMF-28e+ Optical Fiber - Product Information* Recuperado de: `https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/PI1463_07-14_English.pdf`

[30] Chicharro Lopez F. I. (2014) *Transmisión de Señales SSB-OOFDM en Redes Ópticas WDM de Alta Eficiencia Espectral* España: Universidad Politécnica de Valencia