

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

Evaluación de sistemas de comunicaciones ópticas y de radio
sobre fibra a través de la caracterización de sus diferentes
subsistemas y dispositivos

Pedro Lorenzo Gómez

Enero 2015

Evaluación de sistemas de comunicaciones ópticas y de radio sobre fibra a través de la caracterización de sus diferentes subsistemas y dispositivos

**AUTOR: Pedro Lorenzo Gómez
TUTOR: Juan Córcoles Ortega
PONENTE: Jorge A. Ruíz Cruz**



Grupo de Radiofrecuencia, Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

<http://rfcas.eps.uam.es>

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Enero de 2015

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto reside en implementar un sistema de comunicaciones digitales funcional mediante el cual seamos capaces de simular el comportamiento de la señal en dicho sistema al variar diversos parámetros del mismo y de la propia señal, así como los efectos que el ruido tiene en su transmisión.

Dicho sistema digital de comunicaciones se desarrollará en el entorno de programación de Matlab, y será capaz de evaluar los efectos del ruido en el mismo y, por lo tanto, en la propagación o transmisión de una señal por el sistema así como el efecto de la distorsión y la dispersión a través del software de Optilux.

Nos interesa cuantificar el impacto que tiene el ruido en este tipo de sistemas para evaluar su sensibilidad ante dicho fenómeno, e identificar aquellos parámetros a tener en cuenta para minimizar el impacto del ruido sobre la propia señal.

En un primer lugar se desarrollará y evaluará un sistema de comunicaciones digitales de banda base, es decir, transmitiendo una señal sin modulación de radiofrecuencia alguna. Una vez evaluado el comportamiento del sistema al transmitir una señal en banda base se procederá a realizar las modificaciones oportunas para implementar una modulación sobre una portadora de radiofrecuencia de la señal transmitida, que es lo que denominaremos Radio Over Fiber (RoF).

Además, se pretende evaluar el impacto en la señal de parámetros tales como la atenuación, la distorsión y la transmisión de varios canales simultáneamente. Para ello, se empleará el ya mencionado software Optilux.

Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas de las simulaciones realizadas a lo largo del proyecto así como las futuras líneas de investigación en este campo.

ABSTRACT

The main objective of this project is to implement a functional digital communication system by which we are able to simulate the behavior of the signal in this system varying different parameters and the effects that noise has in transmission.

This digital communication system is developed in the Matlab programming environment, and it is able to assess the effects of noise in the system and how it affects the transmission of a signal. The effects of distortion and dispersion are assessed through Optilux software.

We wish to quantify the impact of noise in that kind of systems to evaluate their sensitivity to this phenomenon, and identify those parameters that can minimize the impact of noise on the signal.

First of all, we will develop and evaluate a digital communication baseband system. In a baseband system we transmit a signal without any RF modulation. Once assessed the behavior of the system in transmitting a baseband signal we will proceed to make the necessary changes to implement a modulation on a radio frequency carrier of the transmitted signal, which is what will be called Radio Over Fiber (RoF).

In addition, it is intended to assess the impact of parameters such as modal dispersion, distortion and transmission of multiple channels simultaneously in the signal behavior. To do this, the aforementioned software Optilux will be used.

Finally, the conclusions from simulations conducted are drawn as well as future research in this field.

AGRADECIMIENTOS

Con la finalización de este proyecto concluye una de las etapas más importantes de mi vida. Una etapa que comenzó por el 2008 y que ha durado seis años y la cual estoy muy orgulloso de poder terminar.

Han sido seis años difíciles en los cuales he tenido que afrontar nuevos retos que con sacrificio y dedicación he conseguido superar.

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mi tutor Juan Córcoles por el gran esfuerzo, dedicación e interés mostrado durante la realización del proyecto. Supo mantener mi motivación intacta y siempre estuvo dispuesto escuchar y ayudar. Sin su ayuda este proyecto no habría sido posible.

En segundo lugar, quisiera destacar también a todas las personas que han compartido mí día a día durante estos seis años en la facultad y que consiguieron hacer más llevaderas las horas de clase y prácticas, de los cuales destaco por su calidad como persona a Guillermo Muñoz, Jesús Vázquez, Javier del Sol, Luis Rubio y Sergio Carrero.

Por último, y no por ello menos importante sino todo lo contrario, quisiera agradecer a mis padres el enorme apoyo que me han prestado durante todo este tiempo y a Nuria, quien con su paciencia y vitalidad ha sabido animarme en los momentos difíciles.

Gracias a todos.

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	7
AGRADECIMIENTOS	9
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. MOTIVACIÓN	13
1.2. OBJETIVOS.....	13
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1. INTRODUCCIÓN.....	15
2.2. SOFTWARE	15
3. DISEÑO DE UN SISTEMA DIGITAL SOBRE FIBRA ÓPTICA	17
3.1. MÓDULO TRANSMISOR	18
3.1.1. Introducción.....	18
3.1.2. Conceptos teóricos	18
3.1.3. Tipos de semiconductores	20
3.1.4. Fotoemisores. Diodos LED	21
3.1.5. Fotoemisores. Diodos láser.....	22
3.1.6. Características del transmisor óptico. Comparativa	23
3.1.7. Transmisor desarrollado en Matlab.....	32
3.1.8. Transmisor implementado por Optilux.....	36
3.2. MÓDULO RECEPTOR	38
3.2.1. Introducción.....	38
3.2.2. Conceptos teóricos	38
3.2.3. Filtro paso-bajo	46
3.2.4. Decisor	46
3.2.5. Módulo receptor desarrollado en Matlab	47
3.2.6. Módulo receptor desarrollado por Optilux.....	49
3.3. MEDIO DE TRANSMISIÓN. FIBRA ÓPTICA	50
3.3.1. Introducción.....	50
3.3.2. Conceptos teóricos	50
3.3.3. Modelo de canal desarrollado en Matlab.....	61
3.3.4. Modelo de canal desarrollado por Optilux	64
4. DISEÑO DE UN SISTEMA DIGITAL DE RADIO SOBRE FIBRA (ROF)	67
4.1. MODULO TRANSMISOR	68
4.1.1. Introducción.....	68
4.1.2. Conceptos teóricos	68
4.1.3. Módulo transmisor desarrollado en Matlab.....	70
4.2. MÓDULO RECEPTOR	71
4.2.1. Introducción.....	71
4.2.2. Módulo receptor desarrollado en Matlab	73

5.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL SOBRE FIBRA ÓPTICA IMPLEMENTADO EN MATLAB	76
5.1.	REALIZACIÓN DE PRUEBA BÁSICA DE FUNCIONAMIENTO.....	76
5.2.	EVALUACIÓN DEL EMPLEO DE DIFERENTES TRANSMISORES	78
5.2.1.	Transmisor lineal.....	79
5.2.2.	Transmisor no lineal.....	83
5.3.	EVALUACIÓN DEL CANAL	87
5.3.1.	Canal implementado en Matlab	87
5.3.2.	Canal desarrollado por Optilux	90
5.4.	EVALUACIÓN DE LOS RECEPTORES EMPLEADOS EN AUSENCIA DE RUIDO	94
5.4.1.	Receptor PIN	94
5.4.2.	Receptor APD.....	96
5.5.	EVALUACIÓN DE LOS RECEPTORES EMPLEADOS EN PRESENCIA DE RUIDO ADITIVO	99
5.5.1.	Análisis comparativo entre receptor PIN y APD en presencia de ruido.....	100
6.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA ROF IMPLEMENTADO EN MATLAB	106
6.1.	EVALUACIÓN DE LA MODULACIÓN.....	106
6.2.	EVALUACIÓN DE LA DEMODULACIÓN EN AUSENCIA DE RUIDO	108
6.3.	EVALUACIÓN DE LA DEMODULACIÓN CON RUIDO ADITIVO	111
7.	EVALUACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE VARIOS CANALES	117
7.1.	EVALUACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE VARIOS CANALES SOBRE EL SISTEMA ROF DESARROLLADO EN MATLAB	117
7.1.1.	Evaluación de la demodulación de varios canales con ruido aditivo transmitidos sobre el sistema RoF.....	124
7.2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA WDM IMPLEMENTADO POR OPTILUX.....	126
8.	CONCLUSIONES.....	131
9.	TRABAJO FUTURO	132
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	133
11.	PRESUPUESTO.....	136
12.	PLIEGO DE CONDICIONES	137

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Actualmente, nos encontramos en un periodo liderado por las comunicaciones y el intercambio de información a tiempo real y en formato digital. La importancia de informar o transmitir una información a grandes distancias de forma fiable y rápida ha aumentado de forma exponencial en los últimos años.

Por ello, la innovación y mejora de los sistemas de comunicaciones digitales están en continua evolución con el fin de proporcionar y establecer un sistema de transmisión de información fiable, eficiente y de calidad.

Esta evolución ha propiciado la aparición de nuevos medios de transmisión, tales como la fibra óptica, capaces de proporcionar las prestaciones necesarias en cuanto a velocidad y volumen de información se refiere.

Los sistemas basados en fibra óptica son capaces de transmitir una gran cantidad de datos a velocidades muy superiores a la de otros medios de transmisión físicos y con una tasa de error muy baja, lo que se traduce en una gran fiabilidad.

El gran inconveniente de los sistemas implementados sobre fibra óptica reside en el elevado coste, dependiendo del enlace, de algunos de sus componentes y del sistema en su conjunto. Es por ello por lo que es necesario realizar simulaciones de los enlaces antes de implementarlos físicamente para prever cómo se comportará la señal de información ante la variación de determinados parámetros, como, por ejemplo, la longitud del enlace, la atenuación de la fibra, el ruido, etc.

Una vez caracterizado el comportamiento de todos los parámetros de la señal en entornos controlados (simulación) y comprobado las variables que más pueden afectar a la señal de información o datos, se procederá a la implementación real del mismo teniendo en cuenta los resultados de la simulación.

1.2. OBJETIVOS

Mediante la realización del presente proyecto se pretende implementar un sistema digital de comunicaciones desarrollado en el entorno de programación de Matlab, capaz de evaluar los efectos del ruido en dicho sistema y, por lo tanto, en la propagación o transmisión de una señal por el mismo, así como el efecto de la distorsión y la dispersión a través del software de Optilux. [1]

Optilux es un software de carácter libre y gratuito constituido por un conjunto de librerías en las cuales están implementados los diferentes módulos y componentes propios de un sistema de comunicación.

Entre dichos módulos destacamos el relativo al canal, ya que éste ha sido parametrizado de forma exhaustiva y es uno de los puntos fuertes de Optilux.

Como se ha comentado, el sistema será desarrollado en el entorno de programación de Matlab, el cual ofrece todas las prestaciones necesarias para implementar todos los módulos del sistema.

El principal objetivo reside en crear un sistema de comunicaciones digitales funcional, mediante el cual seamos capaces de simular el comportamiento de la señal en dicho sistema al variar diversos parámetros del mismo y de la propia señal, así como los efectos que el ruido tiene en su transmisión.

Nos interesa cuantificar el impacto que tiene el ruido en este tipo de sistemas para evaluar su sensibilidad ante dicho fenómeno, e identificar aquellos parámetros a tener en cuenta para minimizar el impacto del ruido sobre la propia señal.

En un primer lugar se desarrollará y evaluará un sistema de comunicaciones digitales de banda base, es decir, transmitiendo una señal sin modulación de radiofrecuencia alguna. Una vez evaluado el comportamiento del sistema al transmitir una señal en banda base, se procederá a realizar las modificaciones oportunas para implementar una modulación sobre una portadora de radiofrecuencia de la señal transmitida, que es lo que denominaremos Radio Over Fiber (RoF).

Para comprobar que la implementación del código es correcta se comprobarán los resultados elementales con los obtenidos al introducir la misma señal en el software gratuito Optilux. Ambos resultados deberán coincidir.

Además, se pretende evaluar el impacto en la señal de parámetros como la dispersión modal, la distorsión y la transmisión de varios canales simultáneamente. Para ello, se empleará el ya mencionado software Optilux.

Optilux también ofrece la posibilidad de simular un sistema WDM (Wavelength División Multiplexing). Un sistema WDM se basa en transmitir varias señales a través de la misma fibra. Para ello, se emplean portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda, y sobre cada portadora se transmite una señal diferente.

Es importante respetar la banda de guarda y separación entre portadoras para que no se produzca el efecto conocido como interferencia entre símbolos (IES). Dicho efecto se produce cuando una señal invade la banda de la señal contigua.

Mediante la simulación de diferentes entornos y la variación de determinados parámetros se obtendrá una serie de resultados, de los cuales podrán extraerse las principales conclusiones del proyecto.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

El campo de la simulación de sistemas se podría considerar como un campo relativamente amplio y, por ello, es posible encontrar un gran número de programas o softwares que simulen sistemas de comunicaciones.

Sin embargo, si cercamos la búsqueda a sistemas de comunicaciones ópticas observaremos que no resulta fácil encontrar programas o softwares realmente eficientes que simulen un enlace de comunicaciones ópticas. No obstante, sí existen un conjunto cuyas prestaciones son altamente competentes para el desarrollo de nuestro proyecto, como se expone a continuación.

2.2. SOFTWARE

Entre los software existentes, ha sido el de Optilux el escogido para emplearlo en la realización del proyecto.

Optilux es un potente software de libre disposición formado por una serie de herramientas o módulos implementados en Matlab, que proporcionan la capacidad para diseñar, simular y analizar un sistema completo de comunicaciones ópticas con un nivel de fiabilidad y fidelidad realmente alto.

La principal ventaja de Optilux, que lo sitúa entre uno de los mejores entornos de simulación para comunicaciones ópticas, la encontramos en la exhaustiva caracterización que realiza del medio de transmisión, en este caso, la fibra óptica.

La simulación de la propagación de la señal a través de la fibra óptica es realmente fiel a la realidad, ya que tiene en cuenta numerosos factores, como la distorsión o la dispersión modal.

Para realizar una simulación fidedigna a la realidad Optilux se basa en diversos métodos matemáticos que emplea para resolver la ecuación de Schrödinger, además de considerar la atenuación y otros factores no lineales.

Otro aspecto a destacar lo encontramos en la gran cantidad de parámetros y variables que se pueden modificar tanto en el ámbito del canal como en el de la señal a transmitir. Pese a centrar la mayoría de su potencial en la simulación del canal, Optilux también presenta un módulo transmisor y receptor, junto con otro módulo encargado de calcular el diagrama de ojos y la tasa de error.

Así mismo, Optilux nos ofrece la posibilidad de enviar varios canales simultáneamente y simular los efectos que afectarían a dichos canales.

Atendiendo a todas estas razones anteriormente expuestas, se considera a Optilux uno de los mejores entornos de simulación para sistemas de comunicaciones ópticas.

Sin embargo, el software de Optilux también presenta una serie de carencias, destacándose la de no incluir los efectos del ruido en la simulación y la complejidad del código empleado.

Otro aspecto negativo son las dificultades a la hora de modificar código ya existente o depurar el programa, debido a que presenta una alta opacidad.

Pese a todo, Optilux es el software escogido para realizar las comparaciones de los resultados obtenidos mediante la simulación del código desarrollado en Matlab.

Cabe mencionar que existen otros softwares comerciales, como “Light Trans” o “Optisystem”, los cuales también ofrecen unas altas prestaciones en la simulación de sistemas de comunicación ópticas, sin embargo, no son de carácter libre ni gratuito.

3. DISEÑO DE UN SISTEMA DIGITAL SOBRE FIBRA ÓPTICA

En esta sección se procederá a explicar los diferentes módulos que componen el sistema digital sobre fibra óptica. El objetivo de este sistema es evaluar la transmisión de una señal digital a través de la fibra óptica y de la influencia sobre la misma de diferentes parámetros, como son el ruido y la distancia, entre otros.

El sistema digital sobre fibra óptica estará compuesto por un módulo transmisor, el canal y el módulo receptor. En el módulo transmisor se realizarán todas las operaciones relacionadas con la adecuación de la señal al canal, como, por ejemplo, la conversión de la señal eléctrica en señal luminosa.

El canal, que en nuestro caso se tratará de fibra óptica, simulará la propagación y degradación de la señal procedente del transmisor.

Por último, en el módulo receptor se llevarán a cabo las operaciones necesarias para recuperar la señal transmitida y adecuarla para su posterior tratamiento. En este módulo tiene lugar la conversión óptico-eléctrica de la señal recibida.

Un aspecto a tener en cuenta en un sistema de comunicaciones ópticas son las ventanas de operación. En función de la atenuación apreciada para una determinada longitud de onda nos encontraremos en una ventana de operación u otra. Existen tres ventanas de operación, no obstante, en el presente proyecto se ha procurado operar en la tercera ventana de transmisión. Esto es debido a que es la que presenta una menor atenuación en torno a la longitud de onda en que se opera en comunicaciones ópticas modernas (1550 nm).

Las longitudes de onda en torno a las cuales se opera en la primera y segunda ventana son 850 nm y 1310 nm respectivamente.

El esquema empleado para el sistema digital ha sido el siguiente:

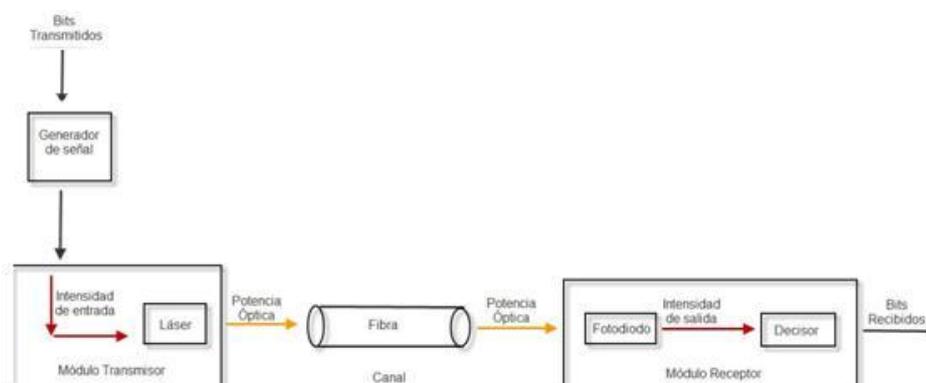


Figura 3.1. Esquema Sistema Digital

3.1. MÓDULO TRANSMISOR

3.1.1. Introducción

El módulo transmisor es el primer elemento que se encontrará la señal a transmitir por el sistema. El principal objetivo de este componente reside en adecuar la señal de entrada al sistema para que pueda ser transmitida con total garantía por el canal.

En nuestro caso, al tratarse de un sistema óptico cuyo canal o medio de transmisión será la fibra óptica, deberemos ser capaces de adecuar una señal eléctrica a una señal óptica (de luz) que pueda ser transmitida por nuestro enlace de fibra. Para ello se emplearán transmisores ópticos compuestos por fotoemisores, los cuales a su entrada reciben una señal eléctrica en intensidad y a su salida proporcionan una señal de potencia (óptica), apta para ser transmitida por la fibra. Los fotoemisores pueden ser de tipo láser o Light Emitting Diode (LED).

El proceso por el cual se produce la conversión electro-óptica se detallará a continuación, así como los diferentes modelos y características de los principales transmisores en comunicaciones ópticas.

3.1.2. Conceptos teóricos

3.1.2.1. Átomos, electrones e interacción materia-luz

La mínima definición de materia conocida es el átomo. Los átomos se agrupan entre sí para formar materia, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso. Los átomos presentan, a su vez, unas pequeñas partículas con carga denominadas electrones que orbitan a su alrededor. La órbita descrita por los electrones está directamente relacionada con el nivel de energía de la capa u órbita en la que se encuentran.

La última capa, denominada capa de valencia, es la que determina la capacidad de un átomo para ganar o perder electrones. Si un átomo presenta un número mayor de electrones que los necesarios para completar la capa de valencia se dice que tiene facilidad para ganar electrones, de lo contrario poseerá facilidad para perderlos.

Es posible provocar el cambio de un electrón de una capa a otra (ya sea inferior o superior), para ello es necesario aplicar una determinada cantidad de energía en forma de campo eléctrico, calor o luz.

La cantidad de energía necesaria para provocar la transición de un electrón de una capa a otra se denomina "cuanto" y se encuentra definida y fijada. Cuando un electrón se traslada a una capa inferior está perdiendo energía que puede convertirse en calor o luz.

3.1.2.2. Fotoemisión en materiales semiconductores

Se denomina fotoemisor al dispositivo que al aplicarle una corriente eléctrica o una diferencia de potencial es capaz de generar un haz lumínico, es decir, transforma intensidad eléctrica en potencia óptica.

Los electrones de los átomos de materia sólida ya no se distribuyen en capas, sino en agrupaciones de capas muy próximas entre sí denominadas bandas.

Las bandas a tener en cuenta son las denominadas banda de valencia y banda de conducción, que se corresponden con las dos últimas bandas. Entre ambas se encuentra un espacio conocido como “banda prohibida”, en la cual no puede haber ningún electrón.

Lo que permite que exista corriente, y que por lo tanto se pueda producir un haz de luz, es la interacción entre los electrones de la banda de conducción y los huecos dejados por los electrones libres en la banda de valencia. La energía para que se produzca dicha interacción deberá ser superior a la energía de la banda prohibida, conocida como energía de “gap”.

Los materiales aislantes presentan una banda prohibida muy amplia y por lo tanto sería necesario aplicar una gran cantidad de energía para superar la energía de gap. Por el contrario, los materiales conductores se caracterizan por no presentar banda prohibida y, de modo que siempre hay conducción. El punto intermedio lo encontraríamos con los materiales semiconductores, que son los actualmente empleados para la implementación de los fotoemisores.

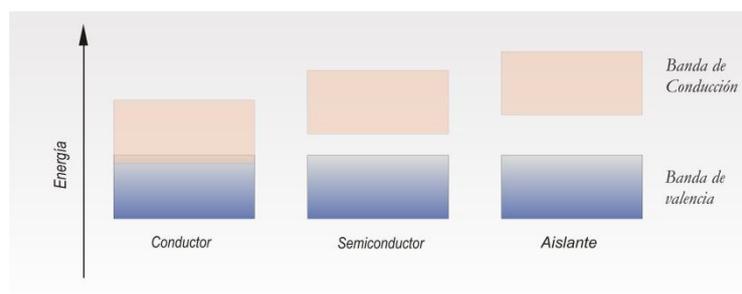


Figura 3.1.1. Tipos de materiales [2]

Existen dos tipos diferentes de emisión:

- **Emisión espontánea:** Cuando un electrón se encuentra en un nivel de energía superior, tiende a caer al nivel energía inferior de tal modo que mediante esta pérdida de energía se generarán los fotones del haz de luz.
- **Emisión estimulada:** Un fotón generado puede estimular la caída de un electrón a un nivel inferior si tiene una energía igual a la diferencia entre ambos niveles, produciéndose un segundo fotón idéntico al que ha provocado el cambio de nivel del electrón.

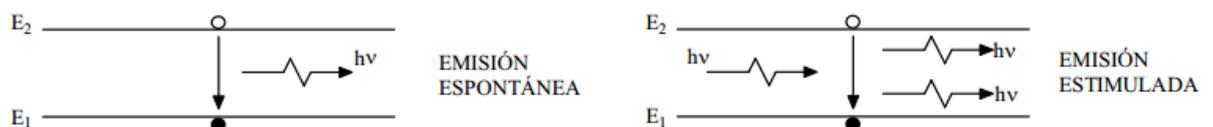


Figura 3.1.2. Tipos de emisión

3.1.3. Tipos de semiconductores

3.1.3.1. Semiconductores intrínsecos

Se trata de un material sólido formado por átomos de valencia 4. La distribución de concentración de electrones en la banda de conducción es igual a la distribución de concentración de huecos en la banda de valencia.

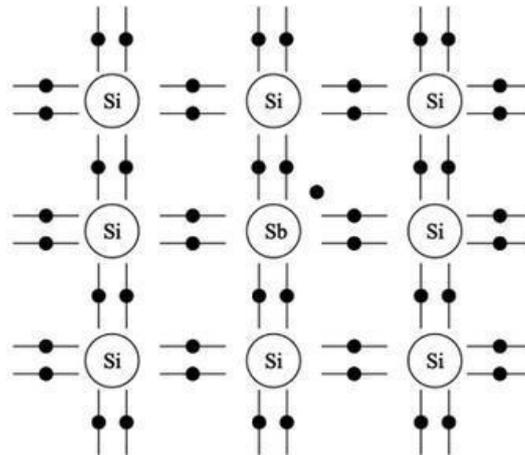


Figura 3.1.3. Estructura semiconductor intrínseco [4]

Semiconductores extrínsecos tipo "n"

Corresponde a un sólido al que se le han añadido impurezas pentavalentes, lo que produce un exceso de electrones. La concentración probabilística de electrones en la banda de conducción será superior a la de huecos en la banda de valencia, por lo que habrá electrones libres.

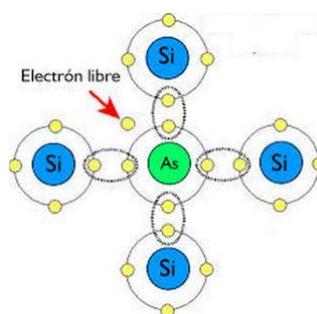


Figura 3.1.4. Estructura semiconductor extrínseco "n" [3]

3.1.3.2. Semiconductores extrínsecos tipo "p"

Se trata de un sólido al que se le han añadido impurezas trivalentes, lo cual ha provocado que la concentración probabilística de electrones en la banda de conducción sea menor que la de huecos en la banda de valencia, de modo que habrá huecos disponibles.

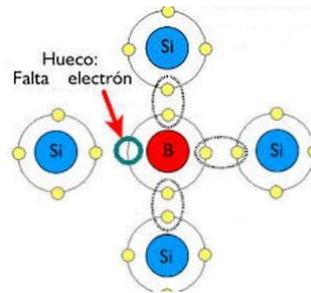


Figura 3.1.5. Estructura semiconductor extrínseco "p" [3]

La estructura escogida para la elaboración de fotoemisores es aquella que combina los extrínsecos de tipo "p" y los de tipo "n", dando lugar a la conocida como estructura "p-n". Los beneficios que presenta dicha estructura residen en que polarizada de forma directa se obtiene una fotoemisión radiativa.

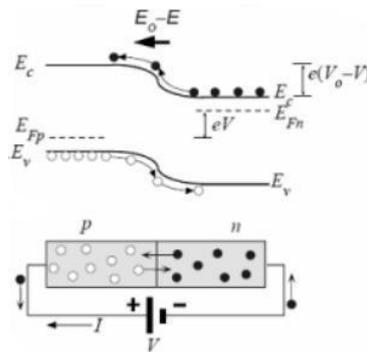


Figura 3.1.6. Estructura p-n polarizada en directa [2]

3.1.4. Fotoemisores. Diodos LED

3.1.4.1. Introducción

Los diodos LED se basan en el principio de la emisión espontánea, por lo que generan un haz de luz incoherente. Esto significa que no están generando un único haz, sino diferentes haces de luz con longitudes de onda también diferentes y en distintas direcciones.

Los diodos LED pueden presentar las siguientes estructuras:

- **Homounión:** se caracterizan por el empleo del mismo tipo de material tanto para la región tipo "p" y tipo "n". Al emplear un solo semiconductor, el volumen de fotones emitidos deberá estar cerca de la superficie para que no sean reabsorbidos. Se produce una elevada cantidad de recombinaciones no radiantes.
- **Heterounión simple:** son aquellos en los que la región activa se encuentra situada entre dos capas de materiales de diferente composición química y que presentan diferentes bandas prohibidas.

- **Doble heterounión:** la banda activa se encuentra limitada por dos capas de materiales diferentes.

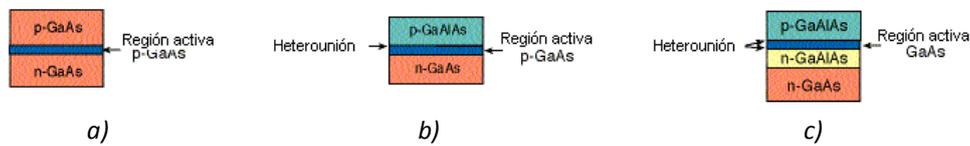


Figura 3.1.7.
Estructuras LED (a) Homounión. (b) Heterounión simple. (c) Heterounión doble. [2]

La longitud de onda de emisión se determina en función de la energía de “gap” del material de la banda activa.

3.1.4.2. SLED (LED de emisión superficial)

Fue desarrollado por Burus y Lawson en 1970, y se trata de una heteroestructura compuesta por una fina región activa que presenta una delgada banda prohibida en comparación con las bandas prohibidas de las regiones que la rodean, siendo éstas mayores.

Como su propio nombre indica, la emisión de luz se realiza a través de la superficie y es canalizada directamente hacia la fibra óptica.

3.1.4.3. ELED (LED de emisión lateral)

Para este tipo de LED se emplea nuevamente una heteroestructura con la única diferencia de que se confina la región activa obligando a que la emisión de luz se realice por el borde o lateral.

En los diodos de tipo ELED se consigue confinar los electrones y los huecos en la capa activa a la vez que se provoca que los fotones generados se transmitan a lo largo del eje del LED y sean radiados por el borde. Esto se consigue gracias al empleo de sucesivas capas de materiales que poseen un gran ancho de banda prohibida.

3.1.5. Fotoemisores. Diodos láser

3.1.5.1. Introducción

Los diodos láser basan su funcionamiento en torno a la misma estructura “p-n” empleada en los diodos LED. La principal diferencia que hace que el láser aporte unas mejores prestaciones que los LED reside en que aprovecha las características de las cavidades ópticas y de la emisión estimulada.

Entre las principales ventajas que le aportan al láser estos nuevos conceptos destacamos la capacidad de crear un haz coherente.

3.1.5.2. Emisión estimulada

Al igual que en el caso de los diodos LED, la estructura “p-n” se polariza en directa para obtener una emisión espontánea de fotones. El comportamiento de un láser y un LED durante la emisión espontánea es prácticamente el mismo, la combinación de pares electrón-hueco es muy similar.

La emisión estimulada tendrá lugar cuando existan fotones en el semiconductor con la misma energía que la diferencia de energía entre electrón-hueco. Los fotones generados durante la emisión estimulada presentarán la misma energía y vector de onda, es decir, la misma fase que los fotones incidentes que provocaron la estimulación.

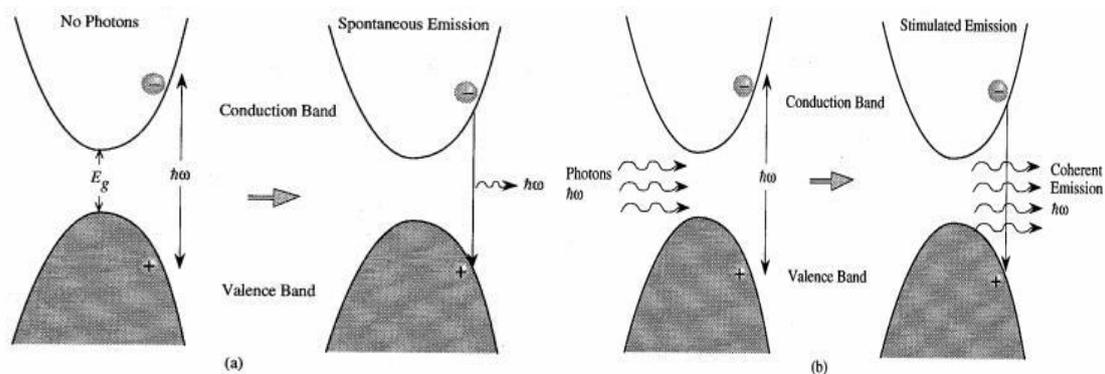


Figura 3.1.8. (a) Emisión espontánea; (b) Emisión estimulada [2]

Para conseguir que se produzca emisión estimulada es necesario que siempre haya electrones en la banda de conducción para que sea posible realizar transiciones, es lo que se conoce como inversión de población, y fotones que estimulen las transiciones.

Para ello, introducimos una corriente de excitación e impurezas altas y procedemos a la retroalimentación del láser con la luz generada.

A modo informativo añadiremos que existen diferentes tipos de láseres en función de cómo se consigue la realimentación. Los láseres más comunes son el láser con cavidad Fabry-Perot, el láser de emisión superficial con cavidad vertical (VCSEL) y el láser con realimentación distribuida. El detalle de los mismos queda fuera del alcance de este proyecto.

3.1.6. Características del transmisor óptico. Comparativa

Para poder comparar un transmisor óptico con otro es necesario analizar las prestaciones que es capaz de aportar en diferentes ámbitos, tales como el espectro de emisión, la curva característica P(I), la eficiencia, la dependencia de la temperatura, la capacidad de modulación, el tiempo de respuesta y el ancho de banda, entre otras consideraciones.

Las características de un transmisor óptico variarán significativamente en función de la fuente o dispositivo generador de luz que se haya escogido. Las dos posibles opciones para generar el haz de luz son los diodos láser o los diodos LED.

Según las prestaciones que queramos obtener del transmisor óptico y el tipo de sistema en el que lo vayamos a integrar, deberemos comparar el comportamiento de ambos dispositivos y observar cual se adapta mejor a nuestro sistema.

3.1.6.1. Espectro de emisión

La pureza de la radiación emitida y su importancia será mayor o menor determinante en función de la aplicación. Para analizar este parámetro debemos observar el espectro de radiación.

- **LED**

Los diodos LED presentan un espectro con un mayor ancho espectral y ofrecen a su salida un haz no coherente, es decir, que presentan diferentes fases, frecuencias, amplitudes y polarizaciones.

Los diodos LED generan impulsos luminosos cuyo espectro de radiación es muy amplio, por lo que no serían los idóneos para emplear como portadoras en una modulación, teniendo en cuenta que para una modulación se necesita una onda con una frecuencia pura.

- **Láser**

Los diodos láser se caracterizan por generar un haz de luz coherente, monocromática cuyas ondas poseen todas la misma frecuencia y fase. Además, los haces generados siguen trayectorias paralelas, por lo que es posible concentrar una gran cantidad de energía en superficies reducidas, como es el caso de la fibra.

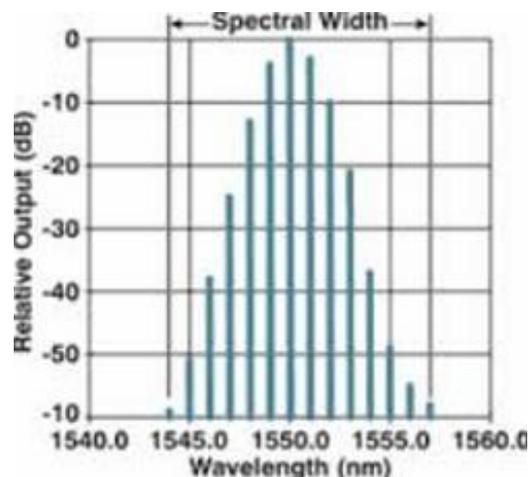


Figura 3.1.9. Espectro emisión láser [5]

Comparativa de espectros:

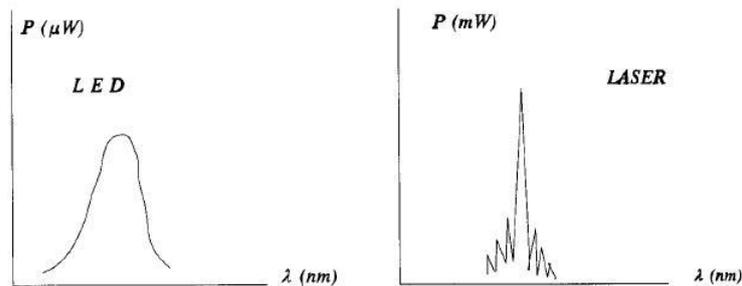


Figura 3.1.10. Comparativa espectro LED y Laser [30]

3.1.6.2. Curva característica potencia-intensidad

Tanto los diodos LED como los diodos láser son dispositivos que al ser alimentados con una intensidad de corriente proporcionan a su salida una potencia óptica equivalente. La potencia óptica proporcionada dependerá de su curva característica.

- **LED**

Presentan una curva característica prácticamente lineal y constante hasta alcanzar la zona de saturación. La zona de saturación es aquella a partir de la cual se obtendrá la misma potencia óptica de salida (potencia de saturación) para cualquier corriente de entrada. El último valor de corriente situado antes de llegar a la zona de saturación se conoce como “corriente de saturación”.

Cuando la corriente inyectada al dispositivo aumenta, la temperatura del mismo aumenta, y el número de recombinaciones eficientes disminuye, de ahí la saturación del diodo.

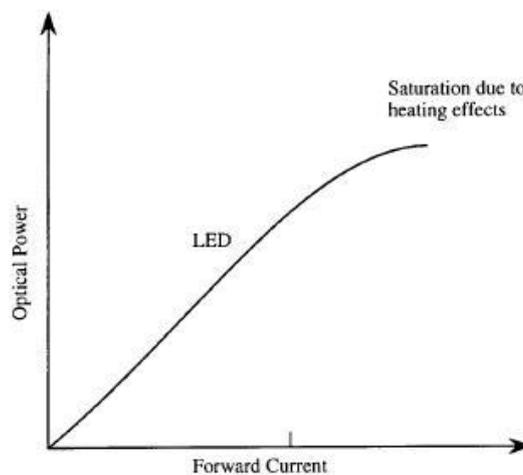


Figura 3.1.11. Curva característica LED [2]

En la imagen podemos apreciar la zona lineal y la zona de saturación comentadas anteriormente.

- **Láser**

La curva característica de los diodos láser presenta un aspecto diferente a la de los diodos LED. Se trata de una curva de aspecto sigmoïdal. La principal característica diferenciadora en torno a la curva intensidad-potencia es el comportamiento del diodo cuando opera por encima o por debajo de la corriente umbral.

Cuando la corriente de entrada al diodo se encuentra por debajo de la corriente umbral (I_{th}), el comportamiento del mismo es muy similar al de un LED. Se dice entonces que el diodo láser se encuentra en la región LED, puesto que la curva característica presenta un aspecto lineal. En este momento se está produciendo lo que anteriormente se ha denominado emisión espontánea.

Si por el contrario la intensidad de entrada supera la corriente umbral (I_{th}), el diodo se encuentra en la región láser y su curva característica presenta un aspecto sigmoïdal. Es a partir de I_{th} cuando se produce la emisión estimulada propia de los diodos láser.

La corriente umbral se define como aquella intensidad de corriente de entrada a partir de la cual la relación intensidad-potencia se obtiene a partir de la región no lineal o sigmoïdal.

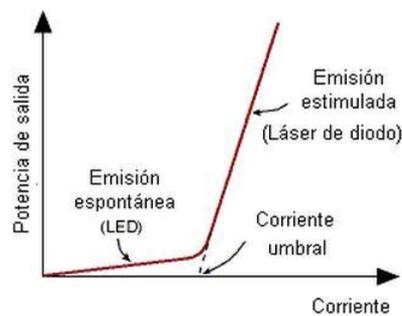


Figura 3.1.12. Curva característica láser [2]

En el caso de los diodos láser no existe región de saturación, de modo que si se sobrepasa un cierto valor de intensidad, el láser sufre daños irreparables. Para ello es necesario emplear electrónica de prevención, es decir, añadir componentes que eviten que se sobrepase la intensidad que provocaría la ruptura del láser.

Por ello, la curva real de potencia-intensidad del láser presentaría el siguiente aspecto:

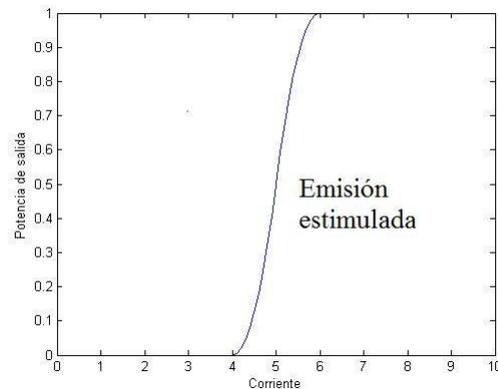


Figura 3.1.13. Curva característica láser real

3.1.6.3. Eficiencia

Denominamos eficiencia a las recombinaciones activas que generen fotones. Se pretende medir la cantidad de fotones emitidos por cada electrón inyectado.

La pérdida de fotones se debe, en gran medida, a que los fotones emitidos pueden ser reabsorbidos por el semiconductor, o a que parte de los fotones sean reflejados en el traspaso de semiconductor-aire (no alcanzan el semiconductor).

Existen diferentes clases de eficiencia, como son la eficiencia externa o interna. Sin embargo, la predominante será la eficiencia cuántica externa diferencial:

- **Eficiencia cuántica externa diferencial (η_{dif}):** Esta eficiencia únicamente aplica a los diodos láser, y mide el número de fotones emitidos por recombinación radiativa por encima del umbral. Se suele estimar de forma experimental, ya que es difícil de medir y su valor puede variar entre el 15 % y el 40%.
- **Eficiencia cuántica total:** Es la eficiencia que se obtendrá para el dispositivo. Se define como el número de fotones emitidos por cada electrón inyectado.

La eficiencia de acoplamiento a la fibra (η_c) está regida por el tipo de terminación de la fibra. Se define como la fracción de potencia emitida por la fuente que se logra transmitir por la fibra.

$$\text{Potencia_fibra} = \eta_c \cdot \text{Potencia_fuente}$$

3.1.6.4. Dependencia de la temperatura

La temperatura es un factor determinante en este tipo de dispositivos debido a que su oscilación provocará cambios significativos en la salida del mismo.

La temperatura influirá notablemente en dos aspectos fundamentales de los dispositivos, en la curva característica potencia-intensidad y en el espectro óptico de radiación (frecuencia de emisión).

El aumento de temperatura tiene lugar cuando introducimos altas corrientes de inyección. Estas corrientes elevadas provocarán un calentamiento del dispositivo y, por lo tanto, un empeoramiento de sus prestaciones.

- **LED**

Como se ha comentado, la inyección de altas corrientes produce el aumento de temperatura del dispositivo y un aumento de la corriente de pérdidas. El calentamiento del dispositivo influirá principalmente en los siguientes aspectos:

- **Curva característica P(I):** Al aumentar la temperatura se producirá una disminución de la potencia óptica de salida. Esta disminución será del orden de $1\mu\text{W}$ por grado centígrado incrementado. Esto es debido a que al aumentar la temperatura se generan más portadores. Cuando dichos portadores no se recombinan en la zona activa, y por lo tanto la atraviesan sin generar fotones, se crea una corriente de pérdidas que influirá negativamente en la corriente total.
- **Espectro óptico:** El aumento de temperatura también repercute de forma significativa en el espectro óptico de emisión. Cuando el dispositivo se calienta, el pico de potencia máxima se reduce y su longitud de onda aumenta, por lo que es trasladado a frecuencias mayores y su anchura espectral de emisión se incrementa.

- **Láser**

Para aplicaciones de muy alta velocidad es necesario aplicar elevadas corrientes de inyección. Dichas corrientes de inyección provocarán el calentamiento del dispositivo. Los factores de mayor importancia en el estudio de la dependencia con la temperatura son:

- **Aumento de la corriente umbral:** Un aumento de la temperatura provocará que la corriente umbral aumente de forma exponencial, de modo que la eficiencia total del láser disminuye. El incremento de la corriente umbral es del orden de 1,5% por grado centígrado.

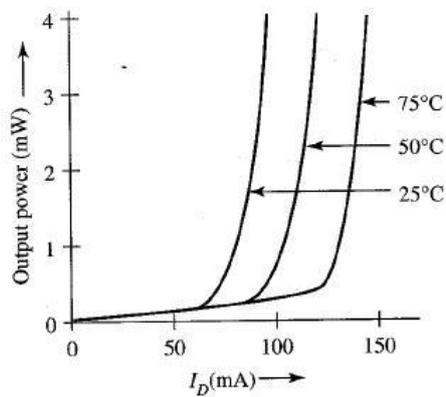


Figura 3.1.14. Aumento corriente umbral [2]

- **Espectro óptico:** Las variaciones de temperatura implican cambios en la longitud de onda emitida por el láser.

3.1.6.5. Modulación

La modulación directa en intensidad presenta las mismas características tanto en los diodos LED como en los diodos láser. La única condición a cumplir consiste en operar en la región lineal del dispositivo, de lo contrario, la señal óptica de salida estará distorsionada.

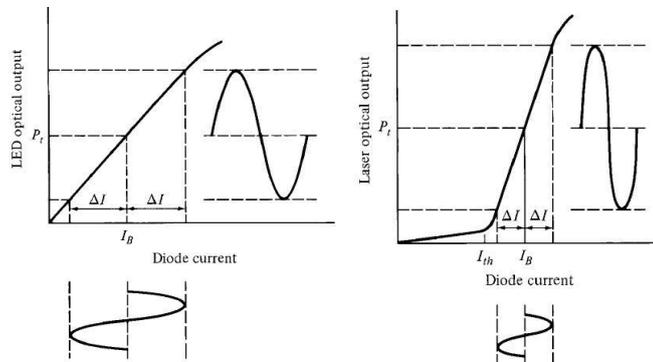


Figura 1.1.15. Modulación directa [2]

Teniendo en cuenta que para realizar modulaciones se emplea principalmente el diodo láser, nos centraremos en este tipo de diodo para estudiar las modulaciones posibles. Las posibles modulaciones aceptadas por el láser, en función de la corriente de polarización del mismo, son:

- **Corriente de polarización inferior a la corriente umbral:** Este tipo de modulación se basa en el encendido y apagado del láser. La corriente pasa de estar por encima del valor umbral a estar por debajo del dicho valor. No se suele emplear en comunicaciones ópticas debido a que la respuesta del láser es muy lenta.

- **Corriente de polarización superior a la corriente umbral:** El láser está polarizado por encima del valor umbral y se le aplican pulsos de corriente, de forma que la corriente oscila entre un valor superior e inferior, pero siempre ambos por encima del valor umbral. Es el tipo de modulación más común empleado en comunicaciones ópticas y se alcanzan anchos de banda de hasta 10 GHz.

Un aspecto que se encuentra íntimamente relacionado con la modulación es el ancho de banda de la señal modulada. Tanto el LED como el láser tienen un ancho de banda limitado que restringe la velocidad de modulación directa y, por consiguiente, la velocidad de transmisión. Este ancho de banda está relacionado con diversos factores, entre los que destacan los tiempos de recombinaciones y la emisión de fotones.

El ancho de banda a 3 dB de un LED es de unos cientos de MHz, mientras que en los diodos láser el ancho de banda puede variar entre 3 y 15 GHz.

3.1.6.6. Tiempo de respuesta

Se denomina tiempo de respuesta al tiempo que transcurre entre el comienzo del impulso eléctrico y el comienzo del impulso óptico. En comunicaciones ópticas la conversión de señales eléctricas en luminosas es un aspecto importante.

- **LED**

En los diodos LED el tiempo de respuesta se debe a la capacidad parásita del diodo, pero es posible eliminarla manteniendo una corriente de polarización directa. El tiempo de respuesta típico de un diodo LED suele ser de 1 μ s, crítico en comunicaciones ópticas

- **Láser**

En un diodo láser el tiempo de respuesta puede ser considerable si se opera por debajo de la región láser, es decir, por debajo de la corriente umbral. Para evitarlo hay que mantener el láser siempre polarizado por encima de la corriente umbral.

Comparativa:

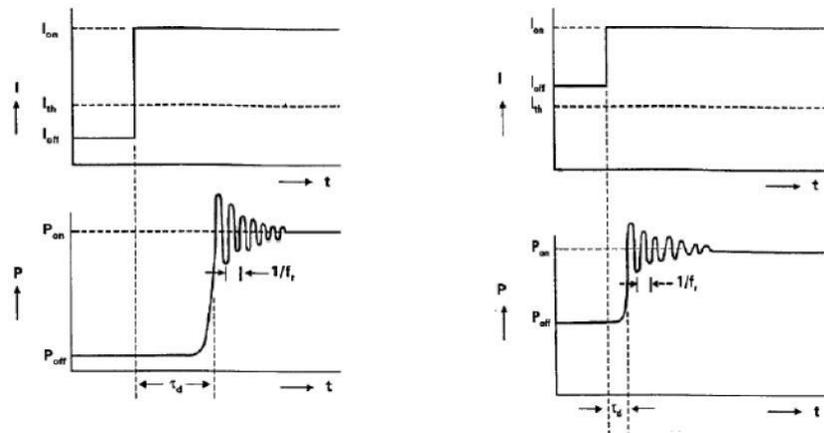


Figura 3.1.16. Comparativa tiempos de respuesta [2]

En la imagen podemos apreciar la diferencia existente en el tiempo de respuesta del láser y el del diodo LED.

3.1.6.7. Aspectos generales y ciclo de vida

Se considera que un transmisor óptico incorpora todos los circuitos y componentes necesarios para hacer trabajar el diodo LED o láser en condiciones estables de modulación durante su ciclo de vida. Entre los diferentes circuitos que lo conforman destacamos el de polarización, modulación, acoplador fuente-fibra, aislador óptico, los circuitos de control de temperatura y potencia, etc.

En sistemas ópticos, el transmisor es el componente con menor tiempo de vida de operación. Para saber cuándo el ciclo de vida de un transmisor ha finalizado se emplean las siguientes técnicas:

- **Mantener la corriente de polarización constante:** El tiempo de vida es el tiempo a partir del cual la potencia de salida cae a la mitad que la inicial.
- **Mantener la potencia de salida constante en el punto de polarización, variando automáticamente la corriente de polarización:** el tiempo de vida es aquel a partir del cual no se puede mantener la potencia.
- **Mantener la temperatura constante junto a la técnica anterior:** Se aplica a diodos láser, y el tiempo de vida es aquel a partir del cual la corriente umbral del láser se duplica.

3.1.6.8. Resumen comparativo y conclusión

A continuación se muestra una tabla comparativa entre diodos láser y LED.

Característica	LED	LD-FP	LD-DFB/DBR	VCSEL
Potencia Emitida	Bajo	Alta		
Eficiencia	Baja	Media-Alta		
Acoplamiento Fuente-Fibra	Baja	Alto		
Espectro de emisión	Ancho	Estrecho	Muy estrecho	
Ancho de banda (modulación)	Bajo-Medio	Alto	Alto-Muy alto	
Sensibilidad a la temperatura			Alta	
Circuitería asociada	Simple	Compleja		
Coste	Muy Bajo	Medio	Alto	Bajo
Ventanas de operación	1ª y 2ª	2ª y 3ª		1ª
Fibra de acoplo	Multimodo	Monomodo		Multimodo
Aplicación típica			WDM	
- Tasa binaria	Baja	Media	Alta	Alta
- Distancia	Corta	Media	Grande	Corta

Figura 3.1.17. Tabla comparativa [2]

Donde:

LED: Light Emitting Diode

LD-FP: Laser Diode - Fabry Perot

LD-DFB: Laser Diode - Distributed Feedback

LD-DBR: Laser Diode – Distributed Bragg Reflector

VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser

3.1.7. Transmisor desarrollado en Matlab

Dadas las características del sistema que deseamos desarrollar y simular se han implementado dos transmisores. Un transmisor lineal, correspondiente a la simulación del diodo LED, y un transmisor no lineal, que se corresponde con la simulación del diodo láser.

Ajeno al transmisor y como un módulo externo, se encuentra implementado el generador de señal. En nuestro caso, dicho generador se encarga de crear señales binarias compuestas por unos y ceros. Para ello, recibe como parámetro de entrada la longitud de la señal o secuencia binaria a transmitir, es decir, el número de símbolos o bits a transmitir, y el número de muestras necesarias para representar cada símbolo. Cuanto mayor sea el número de muestras mejor se apreciará la señal resultante.

El generador implementado en nuestro sistema genera señales binarias conocidas como PAM binarias. La característica que presenta este tipo de señales es que cada símbolo está constituido por un único bit, y en cada periodo de símbolo sólo se puede transmitir un "1" o un "0".

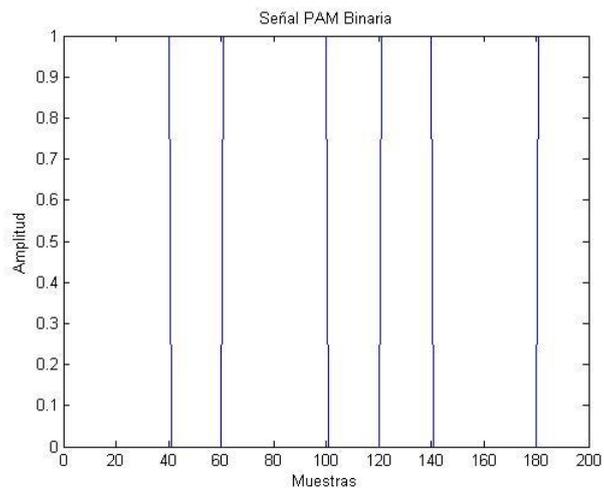


Figura 3.1.18. Señal PAM Binaria

La anterior imagen correspondería a la secuencia binaria (1 1 0 1 1 0 1 0 0 1).

Una vez generada la señal es necesario asignar a los diferentes símbolos un valor de intensidad o voltaje, de forma que se pueda identificar qué símbolo corresponde a un determinado voltaje o intensidad. En nuestro caso se les ha asignado una intensidad que previamente ha sido normalizada por una resistencia de 1Ω , de tal forma que $P = I^2$.

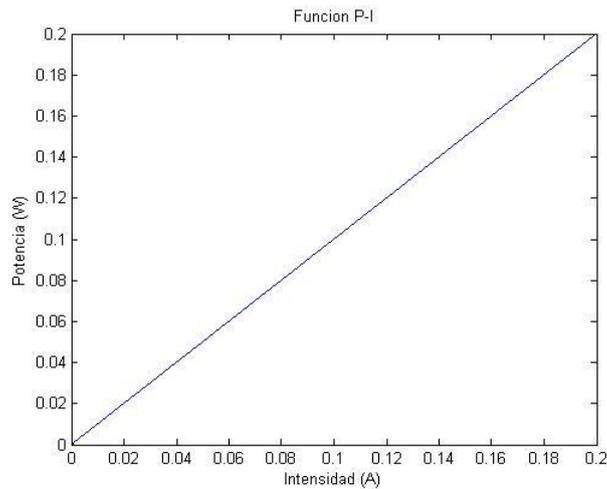
Una vez disponemos de una señal de intensidad, emplearemos dicha señal como parámetro de entrada al transmisor. Será esa la señal en intensidad la que transmitiremos por la fibra óptica, previa conversión en el módulo transmisor de la intensidad en potencia óptica.

Como se ha comentado anteriormente, el transmisor puede comportarse de forma lineal (LED) o no lineal (láser). En nuestro módulo transmisor se han implementado ambas opciones.

Las corrientes definidas en los módulos transmisores han sido:

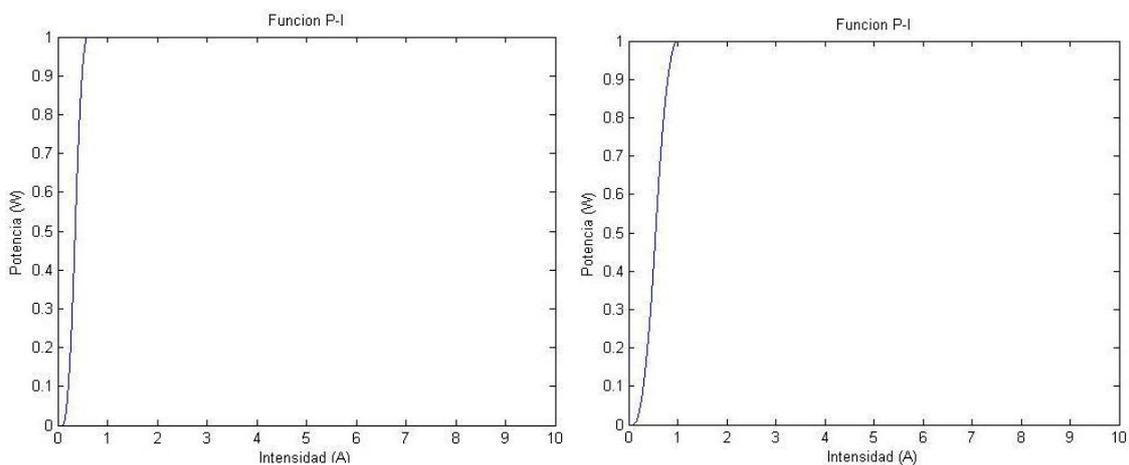
- Corriente umbral: esta corriente cobra sentido en el caso de los diodos láser, ya que los diodos LED no presentan corriente umbral. En el caso de los diodos láser se denomina corriente umbral a aquella corriente necesaria para alcanzar la región láser o sigmoideal.
- Corriente bias o de polarización: es la corriente mínima que se encarga de mantener el diodo polarizado.
- Corriente de saturación: es la corriente máxima que puede presentar a su entrada un diodo sin que se produzca saturación.

Una vez superada la corriente de saturación, el transmisor proporcionara a su salida un valor fijo de potencia, conocido como potencia de saturación. Dicho valor también es pasado como parámetro.



$$I_{th}=0 A, I_b=0.0005 A, I_{sat}=0.2 A$$

Figura 3.1.19. Curva característica lineal (LED)



$$I_{th}=0.1 A, I_b=0.0005 A, I_{sat}=0.6 A$$

$$I_{th}=0.1 A, I_b=0.0005 A, I_{sat}=1 A$$

Figura 3.1.20. Curva característica no lineal (Láser)

En la primera imagen podemos apreciar una curva característica P-I de aspecto lineal, propia de un diodo LED, mientras que la segunda imagen corresponde a una curva característica de aspecto no lineal de un diodo láser.

Se ha empleado un valor de corriente de saturación alto para poder observar la diferencia.

En primer lugar se emplea la corriente de polarización o bias como el eje sobre el cual se centrará la señal de entrada. Si el valor de intensidad de la muestra más el valor de la corriente de polarización está por debajo de la corriente umbral, la potencia óptica de salida será cero.

Si por el contrario el valor de intensidad más la corriente de polarización se encuentra por encima del valor de la corriente de saturación, la potencia óptica de salida será la correspondiente a la potencia de saturación.

Si los valores de intensidad de la muestra más la corriente de polarización se localizan en la región lineal o cuasi lineal, es decir, entre la corriente umbral (I_{th}) y la corriente de saturación (I_{sat}), la potencia óptica de salida se calculará mediante la ecuación de la recta.

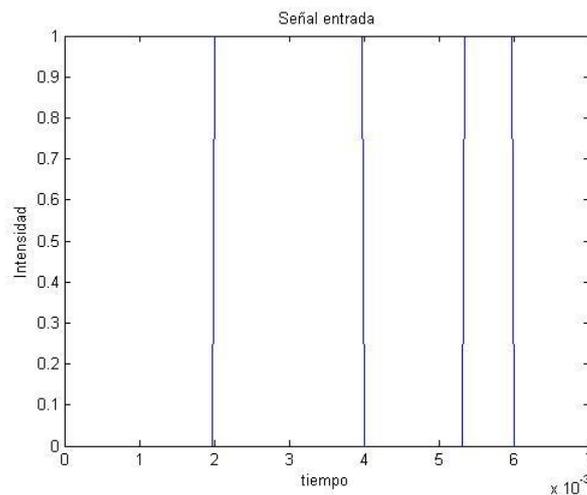


Figura 3.1.21. Señal de entrada

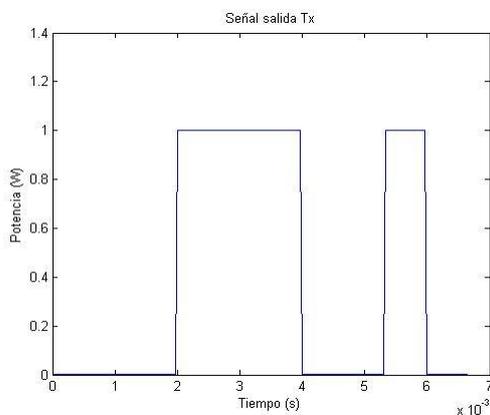


Figura 3.1.22. Señal sin saturación

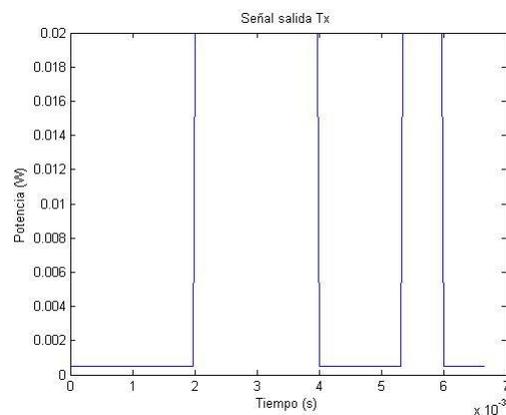


Figura 3.1.23. Señal saturada

En las figuras anteriores se puede apreciar para una misma señal de entrada el efecto de saturación y de no saturación. En la segunda figura se observa una saturación por máximo.

Una vez aplicada la conversión intensidad-potencia a partir de la curva característica, se procederá al envío de la misma a través de la fibra.

Previamente será necesario aplicar la función de acoplamiento a la fibra, la cual consiste en multiplicar la señal obtenida en el proceso de conversión por el factor de acoplo propio de la fibra.

3.1.8. Transmisor implementado por Optilux

Al igual que en nuestro código, el primer paso que sigue Optilux consiste en crear la secuencia de bits que se transmitirá por el sistema. La secuencia de bits se genera a partir del comando “pattern”, el cual devuelve una cadena compuesta por un número entero de símbolos. En nuestro caso, cada símbolo será de un bit. Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos se crea la misma secuencia de bits que para la simulación en Matlab.

Una vez creada la secuencia se procede a asociar la señal eléctrica a dicha secuencia de bits. Para ello se emplea la instrucción “electric source”. Mediante esta instrucción se obtiene la señal eléctrica de entrada al transmisor que modulará la fuente de luz.

Para obtener la señal eléctrica es necesario especificar como entrada los siguientes parámetros:

- Secuencia de bits: cadena de bits a transmitir. Emplearemos la generada anteriormente.
- Tipo de transmisor: el transmisor se caracteriza por asignar un “1” o un “0” a los valores máximos y mínimos de la señal eléctrica, respectivamente.
- Tasa binaria: velocidad de transmisión.
- Pendiente de “roll off”: es el tipo de pulsos escogido para la transmisión. En nuestro caso se emplean pulsos de coseno alzado, los cuales siguen la siguiente expresión:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |t| \leq \frac{(1-r) \cdot d}{2} \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{r \cdot d} \cdot \left(|t| - \frac{(1-r) \cdot d}{2} \right) \right] \right\} & \frac{(1-r) \cdot d}{2} \leq |t| \leq \frac{(1+r) \cdot d}{2} \\ 0 & |t| > \frac{(1+r) \cdot d}{2} \end{cases}$$

- Ciclo de trabajo: define la duración del pulso y su valor deberá estar entre “0” y “1”.

En la siguiente figura se puede apreciar la señal eléctrica creada por un transmisor para diferentes tipos de pulsos y con un ciclo de trabajo igual a “1”. La secuencia de bits de entrada es “0 1 0”.

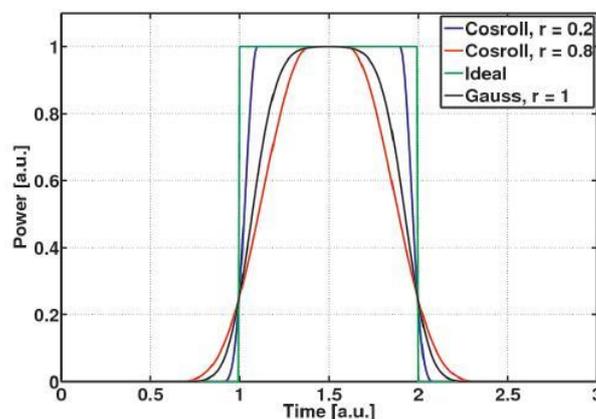


Figura 3.1.24 Pulsos eléctricos [1]

Una vez creada la señal eléctrica, es necesario especificar las características del campo electromagnético que genera la fuente de luz (láser) del sistema. Se podrán definir uno o varios canales en el caso de que se trate de WDM.

Se generarán tantos canales como se indique, cada uno con una potencia de pico específica y separados entre sí un ancho de banda también especificado. La potencia de pico de canal está individualizada, es decir, cada canal podrá tener una potencia de pico diferente, mientras que el espaciamiento entre canales será fijo. También será necesario definir la frecuencia central que se tomará como referencia.

La siguiente figura muestra un ejemplo de WDM con un espaciamiento entre canales de 0.4nm, es decir, 50 GHz (lo mínimo soportado por un láser comercial).

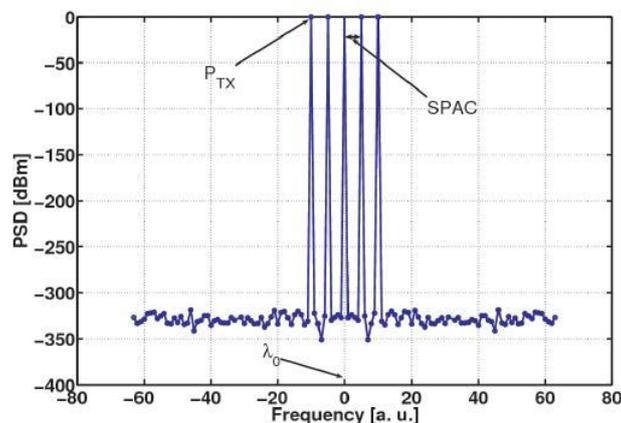


Figura 3.1.25 WDM [1]

Como se puede apreciar, la técnica empleada por Optilux consiste en crear por separado la señal eléctrica y la señal óptica, para después combinarlas y crear así el campo electromagnético que se propagará por la fibra una vez aplicada la modulación directa o modulación lineal (puesto que tiene lugar en la zona lineal de la curva característica).

Seguidamente, se reciben como parámetros de entrada la señal eléctrica y la señal óptica, y se modula la señal óptica en función de la señal eléctrica.

Por último, se genera el campo electromagnético que se transmitirá por la fibra.

Optilux también presenta otros tipos de moduladores, como el “mach zehnder modulator” o el “qi modulator”. Estos tipos de moduladores quedan fuera del estudio del proyecto.

3.2. MÓDULO RECEPTOR

3.2.1. Introducción

El módulo receptor será el último dispositivo que se encuentre la señal antes de abandonar el sistema digital, después de haber transcurrido por los diferentes módulos del mismo.

Al receptor llegará la señal directamente procedente del canal, en nuestro caso la fibra óptica, y su labor residirá en proporcionar una señal a su salida óptima para su posterior análisis.

Para ello, una de las operaciones de mayor importancia que deberá realizar, sino la más importante, es la conversión óptico-eléctrica de la señal que recibirá procedente de la fibra óptica, debido a que la señal transmitida por el canal (la fibra) es de naturaleza lumínica y no eléctrica, que es el tipo de señal que esperamos encontrar a la salida del sistema. Dicha conversión se encargará de realizarla el fotodiodo integrado en el receptor.

En determinadas ocasiones, el receptor deberá revertir las operaciones realizadas en el transmisor que se realizaron para adecuar la señal de entrada al canal de transmisión.

Estas operaciones pueden abarcar desde amplificación hasta demodulación y filtrado.

3.2.2. Conceptos teóricos

3.2.2.1. Conversión óptico-eléctrica

El proceso mediante el cual se produce la conversión de una señal óptica en una eléctrica se denomina efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico se define como el proceso mediante el cual se produce la liberación de electrones en un material cuando incide sobre él radiación electromagnética en forma de luz, ya sea visible, infrarroja o ultravioleta.

Los fotones transmitidos en el haz de luz poseen una determinada energía proporcional a la frecuencia de dicho haz y no a la intensidad lumínica del mismo. Aumentar la intensidad de la luz no incrementa la energía de los fotones, sólo incrementa el número de los mismos en el haz, ya que como se ha comentado, la energía de los mismos depende de la frecuencia del haz de luz.

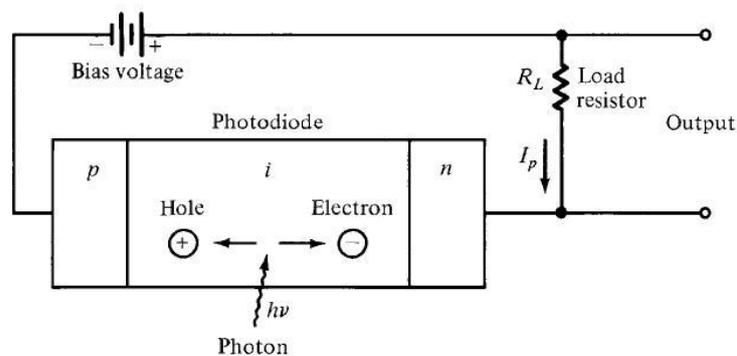


Figura 3.2.1. Efecto fotoeléctrico [2]

Como se ha comentado, la energía del fotón que impacta ha de ser mayor que la energía de gap, lo que implica que existe una longitud de onda máxima de funcionamiento. A longitudes de onda mayores, la energía de cada fotón incidente no es suficiente para excitar a un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción.

La contrapartida la encontramos a longitudes de onda menores. A dichas longitudes de onda el material sigue actuando pero tiene la limitación del coeficiente de absorción, es decir, que las conversiones fotón a par electrón-hueco se generarán en la superficie y el fotón no conseguirá penetrar lo suficiente para generar el par electrón-hueco, de tal forma que contribuya a la corriente.

$$h \cdot f \geq E_g$$

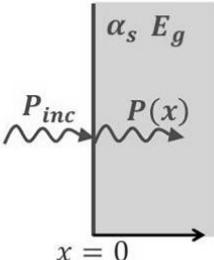
$$P(x) = P_{inc} \cdot e^{-\alpha_s(\lambda) \cdot x}$$


Figura 3.2.2. Coeficiente de absorción [2]

El proceso fotoeléctrico tiene lugar en los fotodiodos. Los fotodiodos más empleados son los de tipo PIN y los de avalancha o APD.

3.2.2.2. Fotodiodos PIN

Un fotodiodo es un transductor que genera un flujo de corriente eléctrica o diferencia de potencial en sus terminales, al incidir sobre él un haz de luz.

Se denominan fotodiodos PIN porque se introduce un material intrínseco entre la unión p-n. Mediante la inserción del material intrínseco entre la unión p-n se consigue aumentar la región de depleción, la cual es una zona que se crea alrededor del punto de unión de los dos materiales semiconductores y la cual carece de electrones libres y huecos.

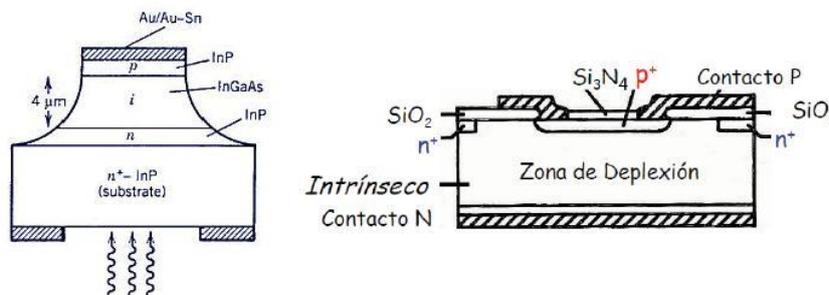


Figura 3.2.3. Fotodiodo PIN [27]

Al aumentar dicha región aumenta también la responsividad, puesto que el número de fotones absorbidos en esa región se incrementa. Un aumento de la responsividad provoca un aumento en la eficiencia del fotodiodo, pero también produce un aumento del tiempo de respuesta, puesto que los pares electrón-hueco generados tardan más tiempo en atravesar la región de deplexión.

En los fotodiodos PIN se consigue que la absorción se produzca únicamente en la capa intrínseca.

El parámetro mediante el cual se cuantifica la capacidad que tiene un fotodiodo para generar pares electrón-hueco a partir de la incidencia de luz se denomina responsividad. La expresión de la responsividad es la siguiente:

$$I_{\text{phd}} = R \cdot P_{\text{inc}}$$

Donde:

I_{phd} : fotocorriente generada (A)

R: responsividad (A/W)

P_{inc} : potencia incidente (W)

Las principales ventajas de los fotodiodos PIN son su reducido coste de fabricación, la sencillez de sus componentes, escasa inserción de ruido en el sistema, alta fiabilidad y gran ancho de banda de trabajo.

Los valores de la corriente de oscuridad no suelen ser significativos y no afectan de forma notable al sistema.

3.2.2.3. Fotodiodos APD

Todos los fotodiodos requieren una potencia óptica mínima para su correcto funcionamiento. Por ello son preferibles los fotodiodos con una elevada responsividad, teniendo en cuenta que necesitarán una menor potencia óptica a su entrada para empezar a funcionar.

Los fotodiodos de avalancha o APD poseen una responsividad mayor que los fotodiodos PIN y por lo tanto se emplearán cuando la potencia a la entrada sea limitada o presente valores muy bajos.

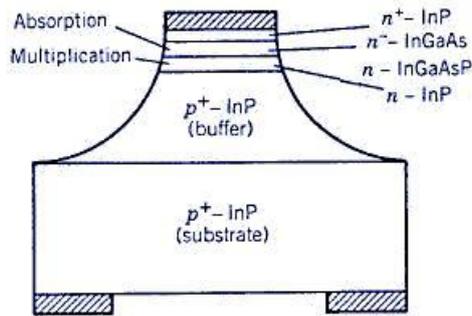


Figura 3.2.4. Fotodiodo APD [6]

Este tipo de fotodiodos basan su funcionamiento en la ionización por impacto, esto es, que un electrón o un hueco generado por la absorción de un fotón con la suficiente energía cinética puede generar nuevos pares electrón-hueco, al ceder parte de su energía para que otro electrón pueda pasar de la banda de valencia a la de conducción.

El efecto de avalancha se produce cuando los pares electrón-hueco creados adquieren la energía cinética suficiente (si el campo es lo bastante intenso para chocar con la red cristalina) produciendo nuevos pares.

Debido a esto, la corriente generada por la absorción de los fotones incidentes se ve incrementada por una ganancia multiplicativa (M) de corriente, la cual se calcula como el promedio de electrones generados por cada fotón. La expresión resultante es análoga a la del fotodiodo PIN, a la que se ha añadido un factor de ganancia.

$$I_{phd} = M \cdot R \cdot P_{inc}$$

Donde:

I_{phd} : fotocorriente generada (A).

M : factor de ganancia o multiplicación.

R : responsividad (A/W).

P_{inc} : potencia incidente (W).

Al multiplicar la fotocorriente generada en la unión "p-n" se consigue un aumento de la sensibilidad respecto a los diodos PIN.

3.2.2.4. Ruido y SNR

El ruido que afecta a un determinado sistema es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del mismo. Por ello, es necesario calcular cuál será su valor para determinar el impacto que éste tendrá sobre el sistema y, sobre todo, el impacto que tendrá en la señal de información propagada por el mismo.

El ruido de un determinado sistema se calcula a la salida del fotodiodo y antes de que la señal pase por el decisor.

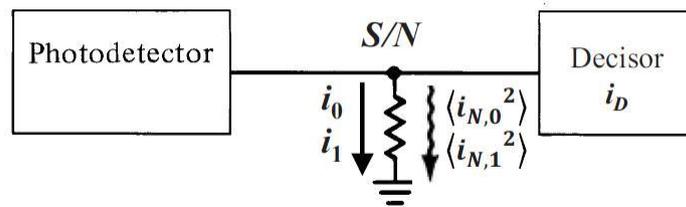


Figura 3.2.5. Ruido [2]

El ruido introducido por los fotodiodos se descompone a su vez en tres tipos de ruido, de los cuales mostramos las fórmulas relativas al cálculo de sus densidades espectrales de potencia:

- Ruido cuántico, de disparo o granalla: se trata del ruido debido a las fluctuaciones producidas por el carácter discreto de los fotones, es decir, no es posible fraccionar el número de fotones que llegan al receptor, ni por consiguiente, el número de portadores generados. Su densidad espectral de potencia viene dada por:

$$\zeta_{\text{shot}} = 2qi_{\text{phd}}M^2F(M)$$

Donde:

q: carga del electrón ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

i_{phd} : corriente de salida (A).

M: factor de multiplicación.

F(M): factor de exceso de ruido.

- Ruido por corriente de oscuridad: es el ruido derivado de la corriente que circula por el diodo cuando éste no está recibiendo potencia óptica. Su densidad espectral de potencia viene dada por:

$$\zeta_{\text{dark,bulk}} = 2qI_{\text{DB}}M^2F(M)$$

Donde:

I_{DB} : Corriente de oscuridad (A)

- Ruido térmico: es el ruido producido por la excitación de las partículas al no encontrarse a una temperatura de cero absoluto (0°K). Su densidad espectral de potencia viene dada por:

$$\zeta_{\text{thermal}} = 4k_{\text{B}}T/R_L$$

Donde:

k_{B} : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

T: temperatura (K°).

R_L : resistencia (Ω).

Los factores en los que aparece el parámetro “M” hacen referencia al factor de multiplicación de los diodos APD y, por lo tanto, sólo será aplicable cuando estemos empleando dicho tipo de receptor.

El factor M, o factor de multiplicación, corresponde al promedio de los electrones generados por cada fotón, mientras que F es el factor de exceso de ruido, dependiente del material con el que se haya fabricado el fotodiodo. El factor de exceso de ruido, F (M), se puede aproximar mediante la siguiente expresión:

$$F = M^x$$

Donde “x” es el parámetro que aporta la dependencia respecto al material y toma valores comprendidos entre “0” (material menos “ruidoso”) y “1” (material muy “ruidoso”).

Una vez identificados y obtenidos los ruidos que afectarán al sistema, y por lo tanto a la señal, se calcula el ruido total y la relación señal a ruido (S/N).

El ruido total del sistema se calculará a partir de las densidades espectrales de potencia de los diferentes ruidos. Una vez obtenida la densidad espectral de potencia del ruido total se aplicará sobre el ancho de banda en recepción. La siguiente expresión refleja lo expuesto:

$$\langle i_j^2 \rangle = \zeta_j \cdot B_e \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{Densidad espectral} \\ \text{de potencia} \\ \text{de ruido} \end{array} \quad \zeta_N = \sum_j \zeta_j$$

Donde:

ζ_j : densidad espectral de los diferentes ruidos presentes.

B_e : ancho de banda en recepción (Hz).

Una vez calculado la densidad espectral total del ruido y tras multiplicarlo por el ancho de banda en recepción procedemos a calcular la SNR a partir de la siguiente expresión que relaciona la densidad espectral de potencia de ruido con la relación señal a ruido:

$$\frac{S}{N} = \frac{i_{\text{phd}}^2}{\langle i_N^2 \rangle} \quad \frac{S}{N} = \frac{i_{\text{phd}}^2}{\zeta_N \cdot B_e}$$

Donde:

i_{phd} : la corriente salida del receptor (A).

Establecida la relación se muestra un detalle pormenorizado del cálculo de la SNR:

$$\begin{aligned}\frac{S}{N} &= \frac{i_1^2}{\langle i_N^2 \rangle} = \frac{i_1^2}{\langle i_{N,\text{phd}}^2 \rangle + \langle i_{\text{thermal}}^2 \rangle} \\ \frac{S}{N} &= \frac{i_1^2}{\langle i_{\text{shot}}^2 \rangle + \langle i_{\text{dark,bulk}}^2 \rangle + \langle i_{\text{dark,surf}}^2 \rangle + \langle i_{\text{thermal}}^2 \rangle} \\ \frac{S}{N} &= \frac{(\mathcal{R}P_1)^2 \cdot M^2}{2q(\mathcal{R}P_1 + I_{\text{DB}})M^2 F(M)B_e + 2qI_{\text{DS}}B_e + 4k_B T B_e / R_L}\end{aligned}$$

Donde:

R: responsividad (A/W).

P₁: potencia óptica asociada al "1" (W).

Dado que el valor de la corriente de oscuridad suele ser despreciable no se suele tener en cuenta en la expresión del cálculo de ruido, quedando la expresión anterior de la siguiente manera:

$$\frac{S}{N} \approx \frac{i_1^2}{\langle i_{\text{shot}}^2 \rangle + \langle i_{\text{thermal}}^2 \rangle} = \frac{(\mathcal{R}P_1)^2 \cdot M^2}{(2q\mathcal{R}P_1 M^2 F(M) + 4k_B T / R_L) B_e}$$

En el caso de que el factor de multiplicación sea igual a la unidad, la expresión de la relación señal a ruido quedaría como sigue:

$$\frac{S}{N} = \frac{(\mathcal{R}P_1)^2}{(2q\mathcal{R}P_1 + 4k_B T / R_L) B_e}$$

Si fuese el caso de que uno de los ruidos predominase notablemente sobre el resto se podría realizar la aproximación de la expresión y considerar ese ruido como el único ruido del sistema.

Una vez establecida la relación, se procede a calcular la tasa de error de bit. Para ello se tienen en cuenta los posibles fallos: se recibe un "0" cuando se ha transmitido un "1" y viceversa.

Suponiendo que los símbolos son equiprobables, que ambos presentan una función de distribución de probabilidad gaussiana y que todos los símbolos se transmiten con la misma potencia, obtenemos:

$$p(1|0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{|i_0 - i_D|}{\sqrt{2\langle i_N^2 \rangle}} \right], \quad p(0|1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{|i_1 - i_D|}{\sqrt{2\langle i_N^2 \rangle}} \right]$$

Siendo su función de distribución de probabilidad gaussiana:

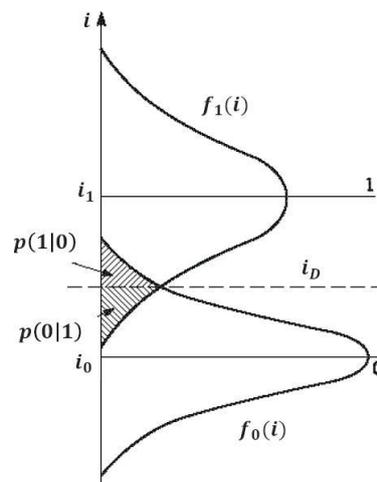


Figura 3.2.6. Fdp Gaussiana [2]

Por último, si consideramos $i_0=0$ y $i_d=i_1/2$ obtenemos:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{i_1}{2 \cdot \sqrt{2 \langle i_N^2 \rangle}} \right]$$

Donde:

i_1 : corriente asociada a la transmisión de un uno.

i_d : corriente asociada a la mitad de la empleada en la transmisión de un uno.

Y:

$$\frac{S}{N} = \frac{i_1^2}{\langle i_N^2 \rangle}$$

Aplicando la relación obtenemos la expresión teórica mediante la cual se calcula el error de bit del sistema o bit error rate (BER):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{S/N}}{2\sqrt{2}} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad \text{con} \quad Q = \frac{\sqrt{S/N}}{2}$$

Siendo su representación gráfica:

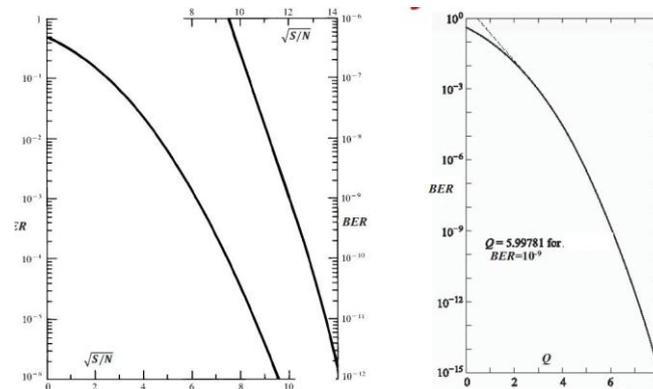


Figura 3.2.7. BER vs S/N [2]

3.2.3. Filtro paso-bajo

Al tratarse en este caso de una señal en banda base, el objetivo del filtro paso-bajo consistirá en limitar la cantidad de ruido que afectará a la señal y evitar una posible interferencia entre símbolos. Para la realización del filtro se ha optado por el empleo de un filtro ideal del mismo ancho de banda que la señal transmitida en banda base.

Dicho filtro, dejará pasar la señal transmitida y el ruido que se encuentre en el ancho de banda de la señal.

3.2.4. Decisor

El decisor será el último bloque por el que pasará la señal. La función del decisor reside en evaluar símbolo a símbolo la señal procedente del filtrado paso bajo y decidir, mediante un umbral, cual fue el símbolo que se emitió originalmente al inicio de la comunicación.

Para ello, es necesario establecer un umbral comparativo y un instante de muestreo sobre el cual tomar la decisión. El umbral para decidir si lo enviado fue un "1" o un "0" se obtiene a partir del diagrama de ojos, o a través de la amplitud de la señal de salida.

El instante de muestreo escogido para la decisión suele ser a la mitad del periodo de símbolo. Este instante es el empleado por un filtro sencillo y de fácil implementación. Existen filtros más complejos, como por ejemplo, el filtro adaptado, que emplean otros instantes de muestreo.

El módulo decisor es uno de los bloques de mayor importancia, teniendo en cuenta que se encarga de regenerar la señal enviada a partir de las decisiones tomadas mediante umbral. A consecuencia, es un bloque muy sensible al ruido, ya que en presencia de éste, y en función del valor del mismo, a veces la elección de si el símbolo enviado fue "1" o "0" no está claramente definida.

Cuando el decisor se equivoca en su elección se traduce como un error de bit o de símbolo, lo que repercutirá en la BER del sistema.

3.2.5. Módulo receptor desarrollado en Matlab

El modelo de receptor desarrollado en Matlab se ha basado en los aspectos teóricos comentados anteriormente.

El bloque receptor recibe como parámetro de entrada la señal procedente del canal de transmisión. Ese tipo de señal es una señal de potencia, y más concretamente, de potencia óptica, por lo que en el receptor se deberá realizar la conversión a intensidad de corriente, que es lo que se obtiene a la salida del mismo.

El aspecto clave y de mayor importancia en el receptor se centra en torno a la función mediante la cual se obtiene la corriente de salida. En función del tipo de fotodetector empleado, APD o PIN, se deberá calcular de una forma u otra y, por lo tanto, será necesario emplear la expresión característica de cada fotodiodo.

En este proyecto hemos realizado la implementación de ambos receptores, uno basado en un fotodiodo PIN y otro en un fotodiodo APD.

En el caso del fotodiodo PIN se reciben como parámetros de entrada la señal procedente del canal y la responsividad.

En el caso del receptor basado en un fotodiodo APD se reciben los mismos parámetros de entrada que en el caso del receptor PIN, pero introduciendo dos nuevos parámetros: el factor de multiplicación M y el factor de exceso de ruido x .

Como se ha comentado en la anterior sección, el cálculo del nivel de ruido y de la relación señal a ruido es realmente importante en los sistemas de comunicación. Por ello se ha desarrollado en Matlab diversas funciones adicionales para realizar dichos cálculos.

En primer lugar, se calcula la potencia empleada en la transmisión de un "1" y se toma el valor de dicha potencia a la salida del canal.

El cálculo del ruido se realiza con la potencia empleada al transmitir un "1", puesto que se considera el peor caso posible, dado que será cuando mayor potencia de señal estaremos enviando y, por lo tanto, mayor potencia de ruido presentaremos.

Una vez obtenido dicho valor, se calculan los valores de todos los ruidos que afectarán negativamente a la señal (térmico, cuántico y de oscuridad) y, a partir de estos valores, se realiza el cálculo del ruido total y de la relación señal a ruido.

Seguidamente, se añadirá el ruido a la señal de salida del receptor sumándolo directamente teniendo en cuenta que se trata de un ruido aditivo.

$$Y(t) = X(t) + n(t)$$

Donde:

$Y(t)$: señal de salida.

$X(t)$: señal de entrada.

$n(t)$: se define como una señal aleatoria gaussiana cuya varianza es la raíz cuadrada de la densidad espectral de potencia de ruido por el ancho de banda calculada anteriormente (potencia de ruido). En nuestro software ha sido calculada mediante la función "random".

Por último, una vez la señal ha pasado por todos los bloques del sistema se calculará la relación señal a ruido, tanto de forma teórica como de forma práctica, y se comparan ambos resultados.

A continuación, se presenta un ejemplo comparativo entre una señal a la salida de un receptor basado en un fotodetector PIN y otro APD:

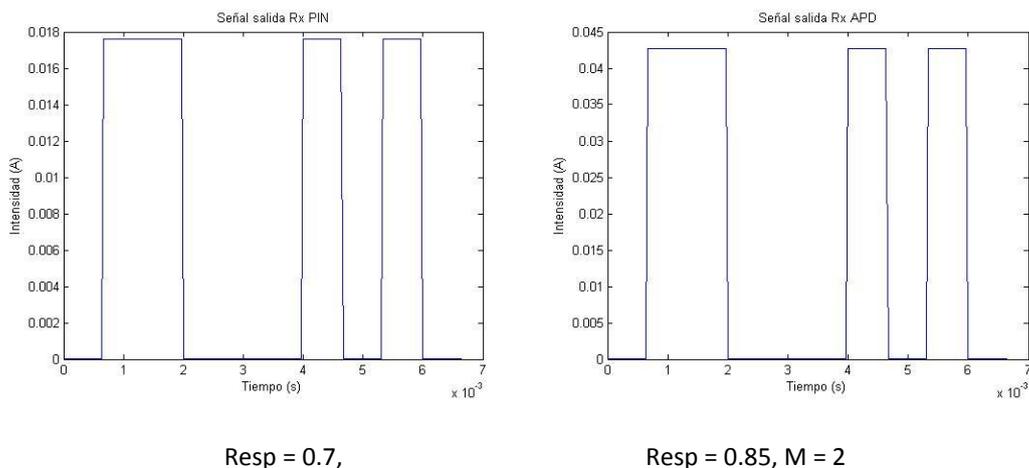


Figura 3.2.8. Comparativa salida PIN y APD

Los ejemplos han sido realizados en ausencia de ruido y con un filtro ideal, puesto que se quería resaltar la diferencia en la recepción entre ambos tipos de receptores. Las pruebas con ruido se realizarán en los apartados posteriores relativos a la evaluación de los sistemas.

3.2.6. Módulo receptor desarrollado por Optilux

Optilux ha desarrollado su receptor basándose en el siguiente esquema:

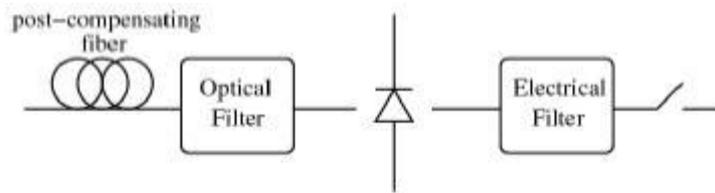


Figura 3.2.9. Modelo receptor Optilux [1]

Como se puede apreciar, emplea dos filtros, uno óptico antes de que la señal pase por el fotodiodo, y otro filtro eléctrico para la señal una vez ha pasado por el fotodiodo.

La principal diferencia con el receptor desarrollado en Matlab reside en que éste únicamente ha empleado un filtro eléctrico y no se ha considerado filtro previo óptico alguno.

Optilux facilita la opción de escoger los tipos de filtro que deseamos emplear, el orden de dicho filtro y su pendiente a 3dB.

Adicionalmente ofrece la posibilidad de incluir parámetros, como la compensación de dispersión y la compensación por pendiente.

Por último, Optilux realiza una comprobación del sistema median una instrucción denominada "b2b" (back to back), lo cual significa que conecta directamente el transmisor con el receptor, es decir, no existe en este caso fibra óptica.

A continuación, se muestra un ejemplo de una señal recibida mediante el receptor implementado por Optilux:

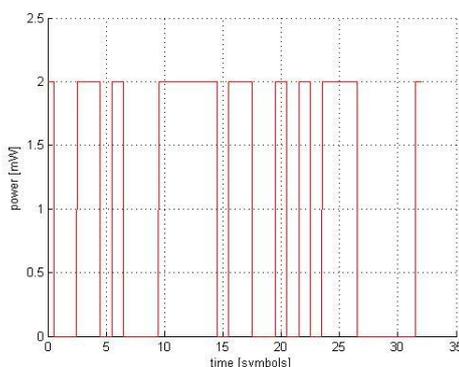


Figura 3.2.10. Señal transmitida

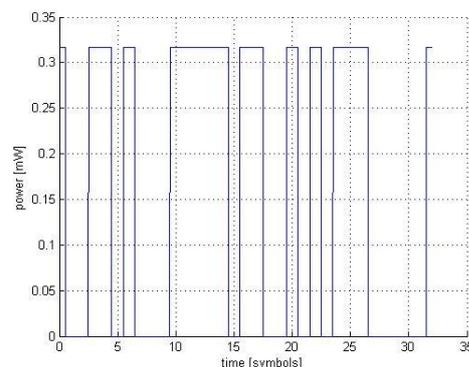


Figura 3.2.11. Señal recibida

De esta forma se pueden comprobar que ambos equipos se encuentran bien calibrados.

Como se ha comentado anteriormente, Optilux no tiene en cuenta el factor ruido en su simulación y, por lo tanto, no lo tiene desarrollado en su código.

3.3. MEDIO DE TRANSMISIÓN. FIBRA ÓPTICA

3.3.1. Introducción

En todo sistema de comunicación existe un canal o medio de transmisión que servirá como soporte para la propagación de la información. Dependiendo de la naturaleza y las características del sistema a diseñar, será conveniente emplear uno u otro medio.

No siempre es posible elegir el medio de transmisión, debido a que éste viene condicionado por el entorno o por las propias características de la señal a transmitir. Este es el caso predominante en la mayoría de los sistemas de comunicación, y por ello será necesario adecuar la señal al canal de transmisión.

En nuestro caso, el medio de transmisión escogido es la fibra óptica, la cual ofrece unas prestaciones y características óptimas para el sistema que deseamos implementar.

3.3.2. Conceptos teóricos

3.3.2.1. Estructura y composición

Se define fibra óptica como el conjunto de una estructura compuesta por 2 capas o cilindros concéntricos de diferentes materiales y espesores. Las capas que componen la fibra óptica son:

El núcleo (core)

Se trata de la primera capa y está fabricada de vidrio dopado. Su espesor depende en gran medida del tipo de fibra, pero suele estar comprendido entre los $8\ \mu\text{m}$ y los $62.5\ \mu\text{m}$.

El revestimiento (cladding)

Esta segunda capa se encuentra envolviendo al núcleo. En las fibras comerciales suele estar compuesta por dióxido de silicio (SiO_2) y presenta un diámetro de $125\ \mu\text{m}$.

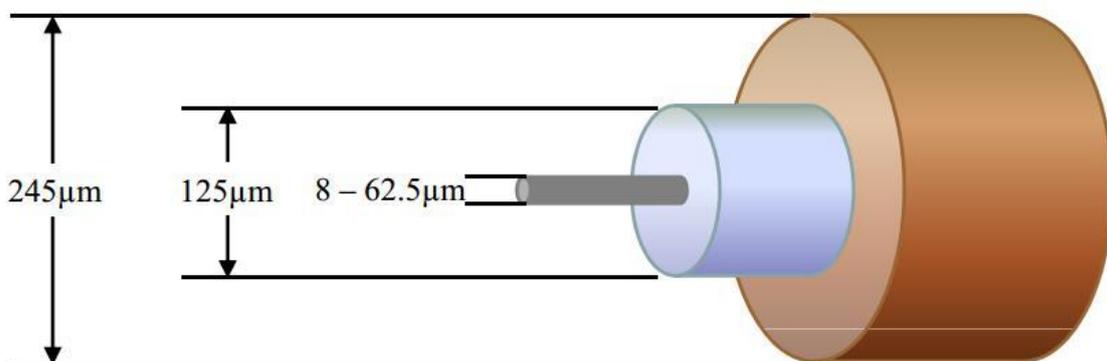


Figura 3.4.1 Estructura fibra óptica [32]

El núcleo se encargará de confinar y transportar por su interior el campo electromagnético generado (haces luminosos), mientras que el revestimiento proporciona alrededor del núcleo una región con un índice de refracción ligeramente menor al de éste.

Como se ha comentado, el índice de refracción del núcleo es ligeramente mayor que el de la envoltura. Este hecho será determinante en el principio de funcionamiento mediante el cual se producirá la propagación de la señal luminosa por el interior del núcleo a lo largo de la fibra.

Definimos el índice de refracción de un material como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en dicho material.

$$n = \frac{c}{v}$$

$$n > 1;$$

Donde,

n: índice de refracción

c: velocidad de la luz en el vacío (m/s)

v: velocidad de la luz en el medio (m/s)

Cuanto más denso sea un medio menor será la velocidad de la luz en éste. Dada la relación anterior, se deduce que el índice de refracción de cualquier material será superior a la unidad.

3.3.2.2. Principio de funcionamiento y propagación

Cuando se hace incidir la luz sobre una superficie plana que separa dos medios dieléctricos, los cuales presentan diferentes índices de refracción, se observan dos fenómenos: el primero es que parte de la energía se refleja y rebota con un ángulo de reflexión igual al de incidencia hacia el medio de procedencia, y el segundo fenómeno corresponde a que parte de la energía se refracta atravesando la superficie variando el ángulo según la ley de Snell. El primer fenómeno se denomina reflexión, mientras que el segundo recibe el nombre de refracción.

Ley de la reflexión

Los ángulos que forman el rayo incidente y el reflejado con la normal a la superficie de separación de los dos medios son iguales.

$$\theta_{\text{incidente}} = \theta_{\text{reflejada}}$$

Ley de la refracción o de Snell

La ley de refracción o ley de Snell nos indica que el producto del seno del ángulo del rayo incidente y el índice de refracción del medio del cual procede el rayo, es igual al producto del seno del ángulo reflejado y el índice de refracción del medio al que pasa dicho rayo.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

O lo que es lo mismo, que los índices de refracción de los dos medios están en razón inversa respecto de los senos de los ángulos que forma la normal a la superficie con las ondas incidente y reflejada.

$$n_1/n_2 = \text{sen } \alpha_2/\text{sen } \alpha_1$$

Refracción y reflexión:

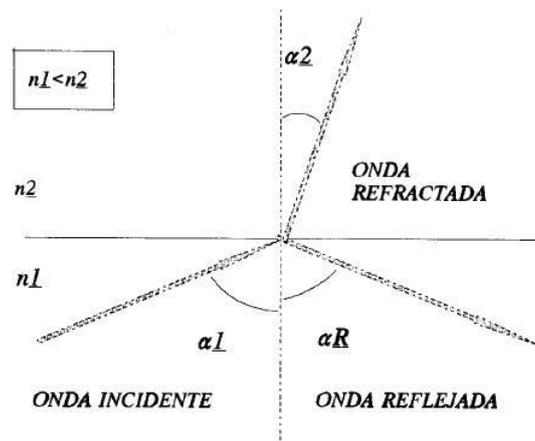


Figura 3.4.2 . Refracción y Reflexión [30]

En función de los valores de los índices de refracción se pueden presentar las siguientes situaciones:

- **$n_1 < n_2$**

El rayo refractado se acercará a la normal al plano de separación de los medios, alejándose de dicho plano.

- **$n_1 > n_2$**

El rayo refractado se acercará al plano de separación de ambos medios. El caso límite se alcanza cuando la onda refractada se propaga por la superficie del plano de separación de ambos medios. Este efecto tiene lugar para un determinado ángulo, denominado ángulo límite.

Ángulo límite

Es el ángulo para el cual el rayo refractado se propaga por el plano de separación de los dos medios. Todos aquellos rayos cuyo ángulo de incidencia sobre el plano de separación sea superior al ángulo límite sufrirán el efecto conocido como reflexión total. Este fenómeno es el que propicia la propagación de la luz a través del núcleo de la fibra. Para que se produzca el efecto de reflexión total, el índice de refracción del núcleo deberá ser mayor que el de la envoltura.

Todos aquellos rayos de luz que incidan con un ángulo que propicie un rayo refractado con un ángulo mayor al crítico, y que por lo tanto provocará la reflexión y transmisión del mismo a través de la fibra, se dice que conforman el cono de aceptación.

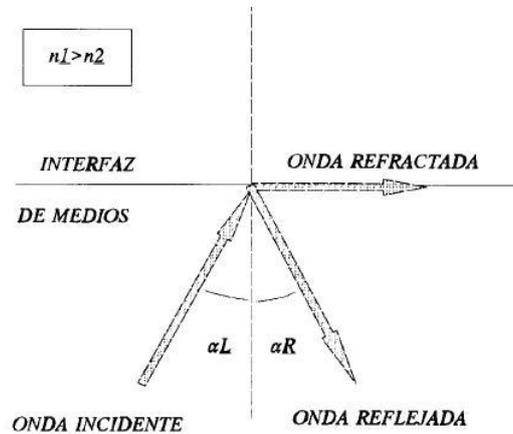


Figura 3.4.3. Reflexión total [30]

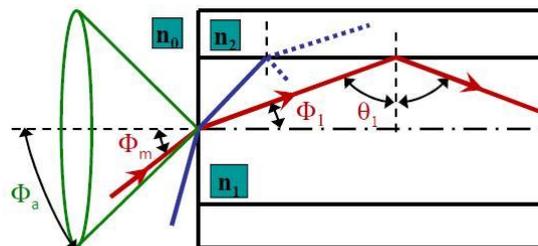


Figura 3.4.4. Cono de aceptación [32]

El ángulo límite se relaciona con la apertura numérica mediante la siguiente ecuación:

$$NA = n \cdot \sin \theta_{0,MAX} = n_1 \cdot \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde,

$\theta_{0,MAX}$: ángulo límite

n_1 : índice de refracción medio 1

n_2 : índice de refracción medio 2

Dada la simetría circular del núcleo de la fibra óptica, todos aquellos haces que se encuentren dentro del cono de aceptación se encontrarán con un ángulo mayor que el límite y serán guiados por el núcleo sin refracción. Los haces que se encuentren fuera del cono sufrirán sucesivas refracciones en los primeros metros de la fibra.

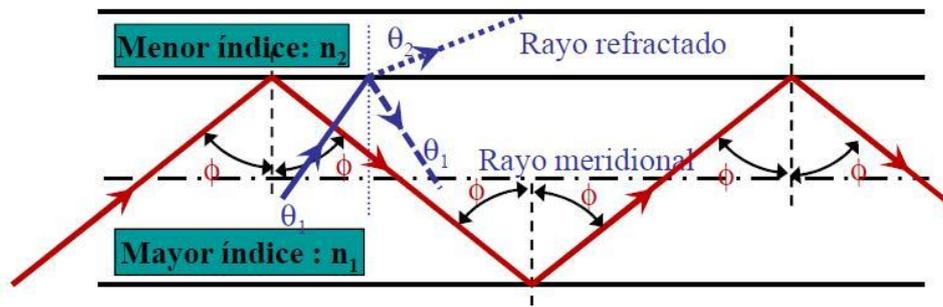


Figura 3.4.5. Propagación por el núcleo [32]

3.3.2.3. Tipos de fibra

La propagación mostrada en el apartado anterior corresponde a un modelo sencillo de propagación y no es completamente rigurosa desde el punto de vista de la teoría electromagnética.

La realidad es que según la teoría electromagnética, los modos guiados, los cuales se pueden definir como las diferentes configuraciones que puede adoptar la onda electromagnética que se propaga por la onda, presentan su energía confinada mayoritariamente en el núcleo de la fibra. Mientras que la energía transportada por la cubierta se rige por una función fuertemente decreciente con la distancia al núcleo.

La distribución de campo en el interior se resuelve a partir de las ecuaciones de Maxwell en coordenadas cilíndricas.

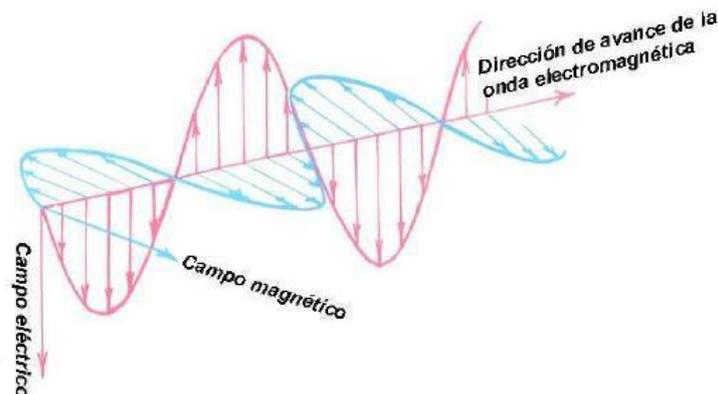


Figura 3.4.6 Onda electromagnética [32]

Dependiendo del número de modos que se propague por la fibra podemos distinguir entre fibras monomodo (propagación de un único modo) y fibras multimodo (propagación de varios modos).

Para determinar si una fibra es monomodo o multimodo se recurre a la frecuencia de corte normalizada.

El valor de dicha frecuencia nos indicará si sólo se está propagando un modo o varios.

Se denomina frecuencia de corte aquella frecuencia a partir de la cual el modo es guiado a través de la fibra. Todos aquellos modos cuya frecuencia fundamental se encuentre por debajo de la de corte no se propagarán a través de la fibra.

La ecuación de la frecuencia normalizada es la siguiente:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \frac{2\pi a}{\lambda} AN$$

Donde,

- λ : longitud de onda (m)
- a: radio del núcleo (m)
- n_1 : índice refracción medio 1
- n_2 : índice refracción medio 2

Si el valor de la frecuencia de corte normalizada es menor o igual a 2.405 nos encontramos que sólo se propagará un modo y, por lo tanto, estaremos en el caso de propagación monomodo, de lo contrario, si el valor de dicha frecuencia es superior a 2.405, nos encontraremos en el caso multimodo.

La ecuación anterior es válida para las fibras de salto de índice o índice abrupto.

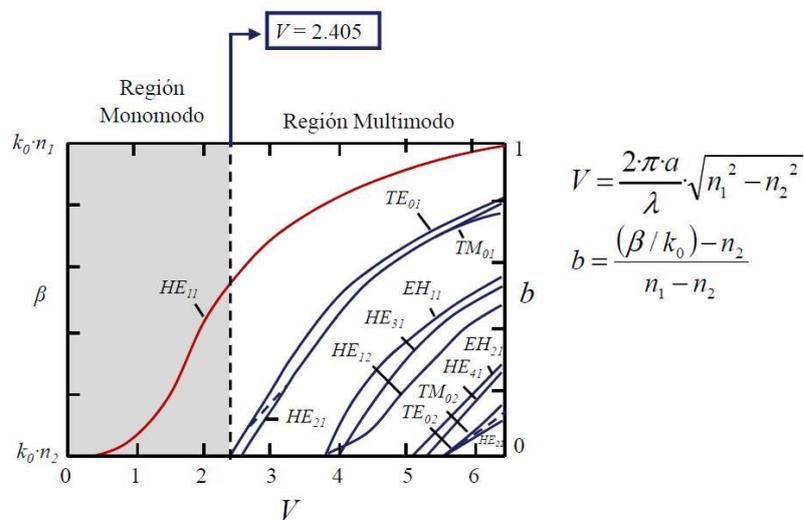


Figura 3.4.7. Frecuencia de corte [32]

Fibra monomodo

La fibra monomodo es aquella en la que únicamente se produce la propagación de un modo. A consecuencia de esto, se eliminan las dispersiones temporales debidas a los retardos entre distintos modos. Para conseguir la propagación de un único modo es necesario reducir lo máximo posible el diámetro del núcleo, por ello este tipo de fibra presenta un diámetro de núcleo de entre 9 y 10 μm .

Todas las fibras monomodo son de índice abrupto y presentan unas características de ancho de banda superiores a las de la fibra multimodo.

Su ventana de trabajo puede estar en torno los 1310 nm, 1550 nm o 1625nm.

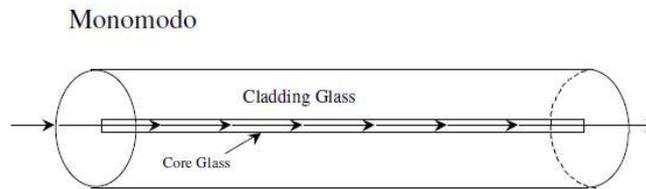


Figure 3.4.8. Fibra monomodo [34]

Fibra multimodo

Este tipo de fibra es capaz de propagar más de un modo simultáneamente a través de su núcleo. Esta propagación multimodo se consigue gracias a irregularidades en la fibra que provocan diferentes refracciones y reflexiones del modo inyectado en la misma. El diámetro del núcleo es mayor que el de la fibra monomodo y está en torno los 50 μm . Además, podrá ser implementada tanto de tipo de índice gradual como de índice abrupto.

La fibra multimodo presenta un menor ancho de banda que la fibra monomodo, y éste será tanto mayor cuanto menor sea el número de modos propagados por la misma.

Su ventana de trabajo se centra alrededor de los 800 y 1300 nm.

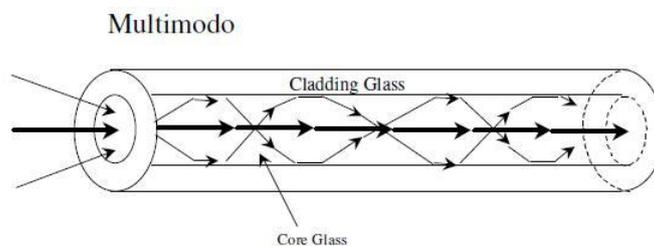


Figure 3.4.9. Fibra multimodo [34]

3.3.2.4. Atenuación y Dispersión

Pese a ser considerado como uno de los mejores medios de transmisión debido a que no le afectan las interferencias electromagnéticas, las señales que se propagan a través de la fibra también se degradan, hasta tal punto que pueden llegar a ser irreconocibles.

Esto es así porque aparecen dos fenómenos que afectarán considerablemente a la señal transmitida por la fibra. Dichos fenómenos son la atenuación y la dispersión.

Atenuación

Se define la atenuación como el mecanismo responsable de la pérdida de potencia de la señal óptica o impulsos luminosos al propagarse por la fibra.

Se calcula estableciendo la relación entre la potencia de señal a la entrada del enlace y la potencia a la salida del mismo. Para establecer la relación de pérdidas por unidad de longitud se procede a dividir el resultado entre la longitud total del enlace medido. Se expresa en dB/Km.

$$P(\lambda) = 10 \log (P_T / P_R) \quad (\text{dB})$$
$$\alpha(\lambda) = (1/L) 10 \log (P_T / P_R) \quad (\text{dB/Km})$$

Un aspecto a tener en cuenta de la atenuación es que no es uniforme respecto a las longitudes de onda, es decir, que dependiendo de la longitud de onda (ventana de trabajo) en la que nos encontremos la atenuación afectará en mayor o menor medida a la señal propagada.

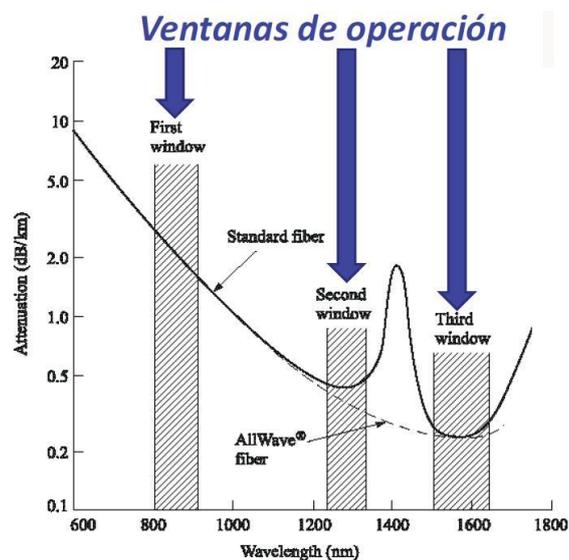


Figura 3.4.10. Atenuación por ventanas [2]

Las causas que producen la atenuación en la fibra podemos clasificarlas en dos grandes grupos:

- Intrínsecas.
- Extrínsecas.

Causas intrínsecas

Son aquellas causas debidas al material en el que está fabricada la fibra. Las causas intrínsecas más comunes son la absorción y el scattering.

- Absorción: se debe a la interacción existente entre los fotones que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo.

Esta absorción se produce principalmente en:

- Región infrarroja: despreciable por encima de 1 μm .
 - Región ultravioleta: aumenta conforme se incrementa la longitud de onda.
- Scattering: Pérdida de potencia óptica al interactuar con el medio. Distinguimos dos tipos de scattering:
 - Scattering de Rayleigh: se produce cuando el haz de luz encuentra en su camino partículas extrañas al medio (impurezas) cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda de la señal. La difracción resultante de la colisión absorbe parte de la energía de la señal, produciendo una pérdida de la misma que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda.
 - Scattering de Raman estimulado: tiene lugar cuando se introducen en una fibra dos o más señales a diferentes longitudes de onda. Es entonces cuando se produce una transferencia de potencia de la señal de mayor frecuencia a la de menor frecuencia.
 - Scattering de Mie: se origina cuando el haz de luz encuentra en su camino partículas cuyo diámetro es mucho mayor que la longitud de onda de la señal. La difracción resultante absorbe parte de la energía de la señal.

Causas extrínsecas

En este caso, las causas no tienen relación con el material de fabricación de la fibra. Las pérdidas debidas a factores extrínsecos más características son las perdidas por curvaturas. Éstas pueden ser:

- Microcurvaturas: son aquellas cuyo radio es del mismo orden que el diámetro de la fibra.
- Macrocurvaturas: el radio es mucho mayor que el diámetro de la fibra.

Dentro de las causas extrínsecas también incluimos las absorciones debidas a impurezas.

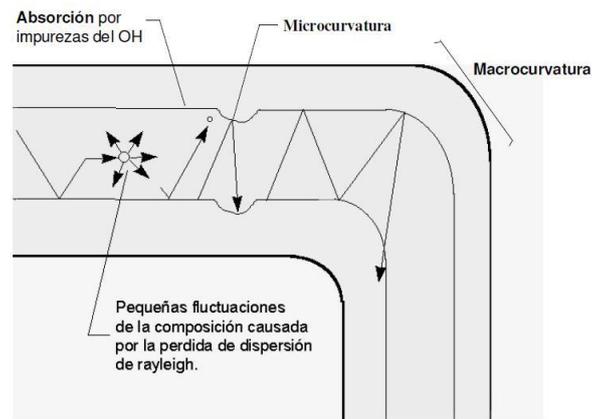


Figura 3.4.11. Macrocurvaturas y microcurvaturas [34]

Dispersión

Se denomina dispersión al ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos a través de la fibra óptica. Este tipo de perturbación afecta seriamente a los sistemas de comunicaciones digitales, ya que es el causante de la interferencia entre símbolos (ISI) y, por lo tanto, de la limitación de la velocidad de transmisión. Existen diferentes tipos de dispersión, los cuales se deben a diversas causas, como son:

- Dispersión intermodal o modal

Según el modelo sencillo de rayos, tiene lugar cuando los distintos rayos propagados a través de la fibra (en el modelo simplificado de la misma) recorren caminos distintos durante su propagación, sufriendo así, según el ángulo, diferentes reflexiones. Esta diferencia en los caminos recorridos se refleja en un retardo en la llegada de los modos al extremo de la fibra. Los modos no llegarán al mismo tiempo, sino que lo harán con un espaciamiento temporal entre ellos inexistente en el instante de su transmisión. Cuanto mayor es la distancia recorrida, mayor es el retardo entre modos y, por lo tanto, mayor es el ensanchamiento del pulso.

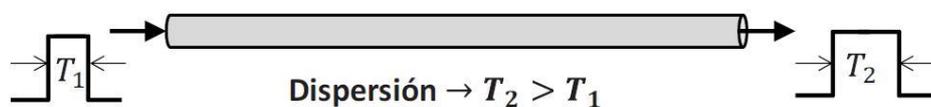


Figura 3.4.12. Dispersión modal [2]

Este tipo de dispersión es la que limitará la velocidad de transmisión de la fibra.

$$t_B - t_A = \frac{\ell}{c} \cdot \left(\frac{n_1^2}{n_2} - n_1 \right) = \frac{\ell}{c} \cdot \frac{n_1^2}{n_2} \cdot \Delta \approx \frac{\ell}{c} \cdot n_1 \cdot \Delta \approx \frac{\ell}{c} \cdot \frac{(NA)^2}{2 \cdot n_1}$$

Dónde:

- l = longitud fibra (m)
- n_1 = índice de refracción medio 1
- n_2 = índice de refracción medio 2
- c = velocidad de la luz en el vacío (m/s)
- NA = apertura numérica

La dispersión modal no afecta a las fibras monomodo, debido a que en éstas solo se produce la propagación de un único modo.

- Dispersión intramodal o cromática

Se produce cuando las componentes del haz luminoso distribuidas en diferentes longitudes de onda no se propagan a la misma velocidad.

Los pulsos dispersos son generados cuando el grupo de longitudes de onda tienen diferentes velocidades de fase.

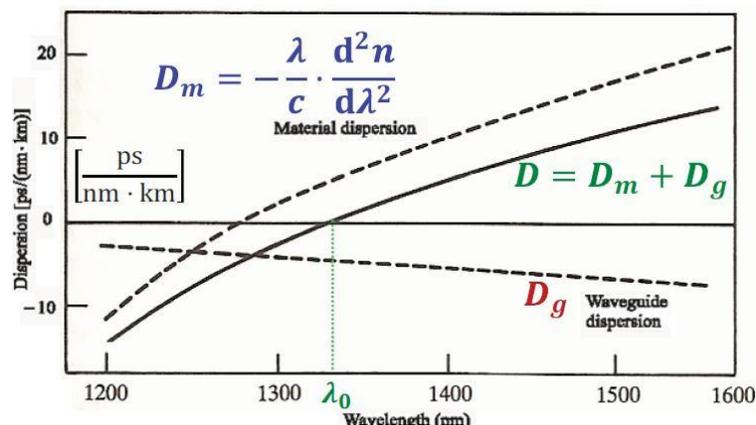


Figura 3.4.13. Curva dispersión cromática [2]

En función del origen del efecto de la dispersión podemos distinguir:

- **Dispersión por el material:** se debe a que el índice de refracción del material es función de la longitud de onda. Se produce una dispersión a la salida del modo de propagación debida a que las longitudes de onda que lo componen viajan a velocidades diferentes. La longitud de onda para la cual se obtiene una dispersión por material nula se denomina longitud de onda de dispersión cromática nula, y depende de cada material.
- **Dispersión por la guía de onda:** es debida a la relación entre las energías que transporten núcleo y envoltura. Depende de la relación entre el radio del núcleo de la fibra y la longitud de onda del haz que se transmite. Presentará un valor mayor o menos en función del diseño de la fibra.

Esta dispersión es la predominante en las fibras monomodo, ya que éstas no presentan dispersión intermodal.

- **Dispersión por polarización modal**

Es debida a la birrefringencia del material, es decir, cada componente ortogonal del campo observa un índice de refracción distinto, lo que provoca la descompensación de la ortogonalidad de las componentes entre sí.

El efecto comentado anteriormente es debido a asimetrías en la geometría de los núcleos de la fibra, a esfuerzos de compresión, flexión o torsión.

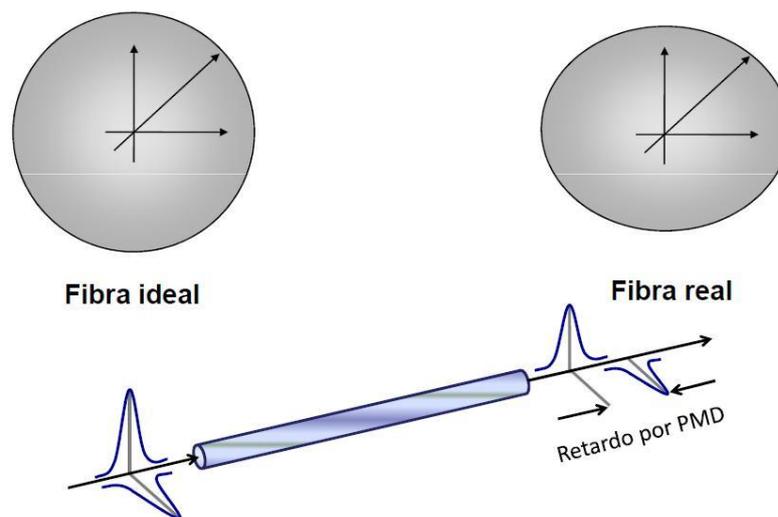


Figura 3.4.14. PMD [32]

La polarización por dispersión modal (PMD) se considera como un fenómeno aleatorio que varía a lo largo del tiempo y que no es lineal con la longitud de la fibra.

Los valores típicos de PMD suelen oscilar entre 0.1 y 0.2 ps/Vkm.

3.3.3. Modelo de canal desarrollado en Matlab

El modelo para simular el canal desarrollado en Matlab ha sido caracterizado en función de la constante de atenuación de la fibra y de la longitud de la misma. El modelo implementado parametriza la atenuación sufrida por una señal que se propague a través de la fibra.

La atenuación que afectará a la señal propagada por la fibra se calcula a partir de la constante de atenuación de la propia fibra y de la longitud de la misma. En primer lugar se obtiene el valor en decibelios de la atenuación total que sufrirá la señal.

Una vez se ha obtenido la atenuación en decibelios, se procede a realizar su conversión a unidades naturales y poder así aplicarla a la señal propagada.

Al realizar la conversión a unidades naturales obtenemos la gráfica de la atenuación en función de la distancia.

A continuación se muestran ambas gráficas de atenuación, tanto en dBs como en unidades naturales:

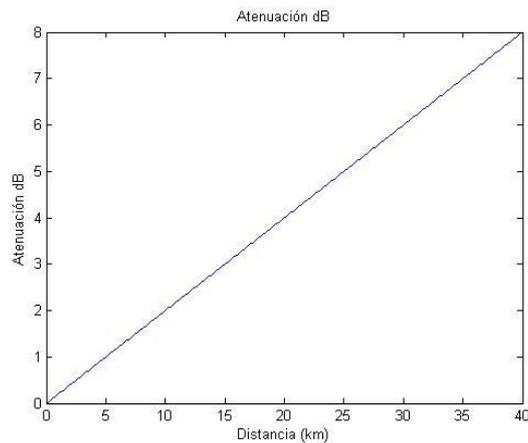


Figura 3.4.15. Gráfica atenuación en dB; $\alpha = 0.2 \text{ dB/Km}$

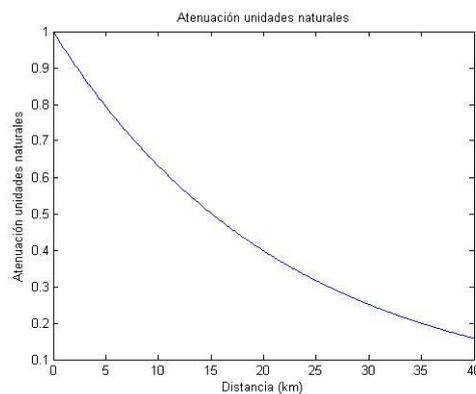


Figura 3.4.16. Gráfica atenuación en unidades naturales; $\alpha = 0.2 \text{ dB/Km}$

Para observar los efectos de la atenuación del canal en la señal transmitida, se realiza una comparación de la forma de onda y de la potencia óptica a la entrada y a la salida de la fibra.

En las siguientes figuras se representa una comparativa entre la señal de entrada y la señal de salida de la fibra. En ellas se puede apreciar el efecto de la atenuación en la amplitud de la señal.

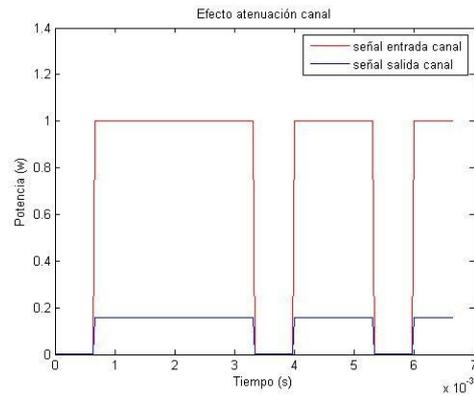


Figura 3.4.17. Comparativa entrada y salida del canal; $\alpha = 0.2 \text{ dB/Km}$ $D=40 \text{ Km}$

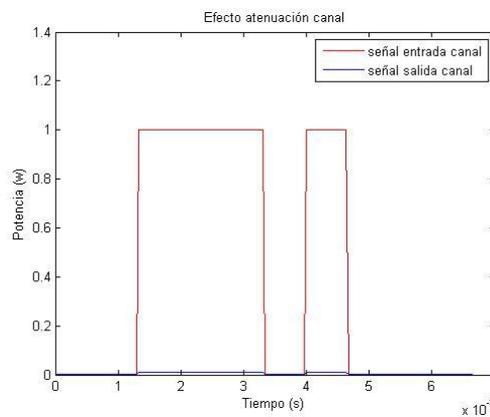


Figura 3.4.18. Comparativa entrada y salida del canal; $\alpha = 0.2 \text{ dB/Km}$ $D=100 \text{ Km}$

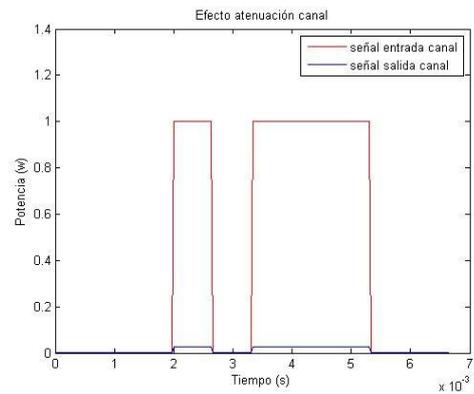


Figura 3.4.19. Comparativa entrada y salida del cana; $\alpha = 0.4 \text{ dB/Km}$ $D=40 \text{ Km}$

Como se ha comentado anteriormente, se puede apreciar el efecto de la atenuación en la amplitud de la señal. Su valor disminuye considerablemente al propagarse a través de la fibra.

La prueba ha sido realizada en la tercera ventana de propagación.

3.3.4. Modelo de canal desarrollado por Optilux

El punto fuerte de Optilux reside en la forma de abordar la modelación del canal de transmisión, en nuestro caso la fibra óptica.

Optilux basa su modelo de canal en la resolución a través de un método numérico de la ecuación no lineal de Schrödinger, que aparece para modelar el campo electromagnético durante la propagación en el interior de la fibra.

La ecuación no lineal de Schrödinger a resolver en ausencia de los efectos de polarización es:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + j\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} - j\gamma |A|^2 A$$

Donde:

j : es la unidad imaginaria.

α : es la constante de atenuación de la fibra (dB/km).

$\beta_k(\omega)$: es la constante de propagación de la onda (rad/m).

γ : es el coeficiente no lineal (1/W*Km).

Optilux ofrece la posibilidad de modificar y parametrizar numerosos aspectos de la fibra. En primer lugar, se deberán especificar parámetros como la longitud de la fibra, constante de atenuación, longitud de onda de trabajo, coeficiente de dispersión cromática a la longitud de onda de trabajo y la pendiente del dicho coeficiente a esa longitud de onda.

Una vez definidos los parámetros básicos de la fibra, se procederá a especificar aquellos que modelarán los efectos no lineales en la misma. Para ello será necesario especificar el área efectiva de la fibra y el índice de no linealidad de la misma.

La no linealidad de la fibra aparece como consecuencia del efecto Kerr, el cual se define mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}}$$

Donde:

A_{eff} : área efectiva de la fibra (μm^2).

n_2 : índice no lineal de la fibra (m^2/W).

Por último, se definirán los parámetros relativos al método numérico para la resolución de la ecuación no lineal.

A la hora de realizar simulaciones donde se tengan en cuenta los efectos de polarización, será necesario definir los parámetros que modelen la polarización modal.

La ecuación no lineal a resolver cuando se tienen en cuenta los efectos de la polarización es:

$$\frac{\partial \mathbf{A}(z, \tau)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} \mathbf{A} - i \frac{\Delta\beta_0}{2} (\hat{l}(z) \cdot \vec{\sigma}) \mathbf{A} - \frac{\Delta\beta_1}{2} (\hat{l}(z) \cdot \vec{\sigma}) \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \tau} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial \tau^2} - j\gamma \left[|\mathbf{A}|^2 \mathbf{A} - \frac{1}{3} (\mathbf{A}^\dagger \sigma_3 \mathbf{A}) \sigma_3 \mathbf{A} \right]$$

Al igual que en el modelo desarrollado en Matlab, los efectos de la atenuación se pueden apreciar en la amplitud de la señal a la entrada y salida del canal.

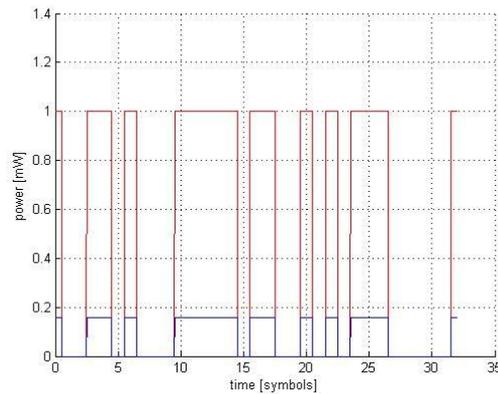


Figura 3.4.20. Comparativa entrada y salida del canal; $\alpha = 0.2 \text{ dB/Km}$ $D=40 \text{ Km}$

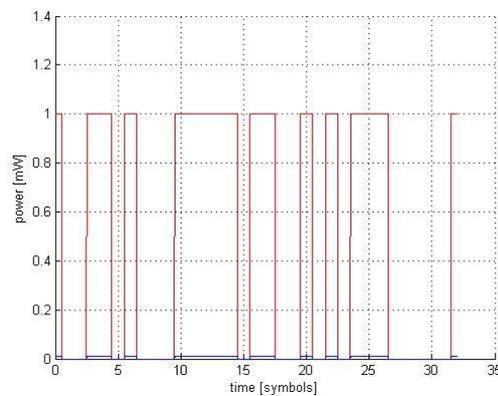


Figura 3.4.21. Comparativa entrada y salida del canal; $\alpha = 0.2 \text{ dB/Km}$ $D=100 \text{ Km}$

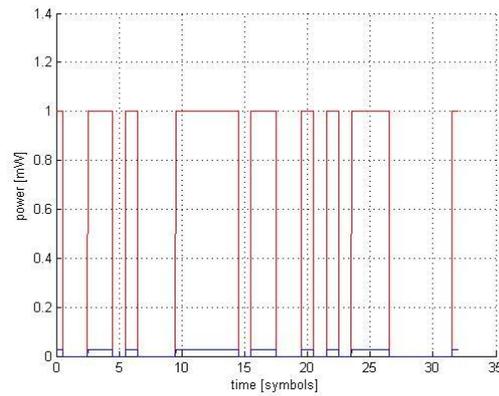


Figura 3.4.22. Comparativa entrada salida del canal; $\alpha = 0.4$ dB/Km $D=40$ Km

Como se ha comentado anteriormente, Optilux ofrece también la posibilidad de simular la dispersión PMD. Sin embargo, no se profundizará más en este campo ya que queda fuera del alcance del presente proyecto por requerir el empleo de transmisores y receptores más complejos.

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DIGITAL DE RADIO SOBRE FIBRA (ROF)

Como se ha ido comentando en varias secciones a lo largo del proyecto, es posible que tengamos que transmitir un gran volumen de información a grandes distancias. Habrá veces que la información a transmitir la podamos enviar a través de un canal dedicado o específico, no obstante, otras veces será necesario compartir el canal o simplemente aprovecharlo al máximo posible para enviar una mayor cantidad de información.

En lo que respecta a nuestro proyecto, es de gran utilidad la idea de radiar la información transmitida, es decir, la señal se propaga a través de fibra óptica hasta llegar a una unidad que se encargue de su radiación al medio (antena). Mediante este sistema se consigue una sinergia entre las prestaciones de la fibra óptica (velocidad y gran volumen de datos) y de la propagación de la señal en medio abierto (se pueden cubrir mayores distancias).

La idea principal, tanto en transmisión como en recepción, reside en la propagación de la señal a través de fibra óptica desde el transmisor a la antena y de la antena al receptor, respectivamente.

Para ello, será necesario distribuir las diferentes señales en el espectro de frecuencias de forma que no se interfieran unas a otras y trasladar la señal a una frecuencia lo suficientemente elevada para proceder a su radiación al medio. El proceso mediante el cual trasladamos una señal a una frecuencia mayor se denomina modulación, empleando para tal fin una señal portadora.

La realización del proyecto se ha centrado en analizar la transmisión de una señal modulada a altas frecuencias a través de fibra óptica y su posterior recepción, y de la influencia sobre la misma de diferentes parámetros, tales como el ruido, el régimen binario o la distancia del enlace entre otros.

No se ha procedido a implementar la parte de radiación al medio de la señal, teniendo en cuenta que lo que se pretende evaluar en este proyecto es el comportamiento de una señal modulada a altas frecuencias al propagarse por fibra óptica.

Para la implementación del sistema digital de radio sobre fibra ha sido necesario incorporar nuevos módulos, tanto en la parte de transmisión como en recepción. El detalle de los módulos introducidos se presentará en las siguientes secciones.

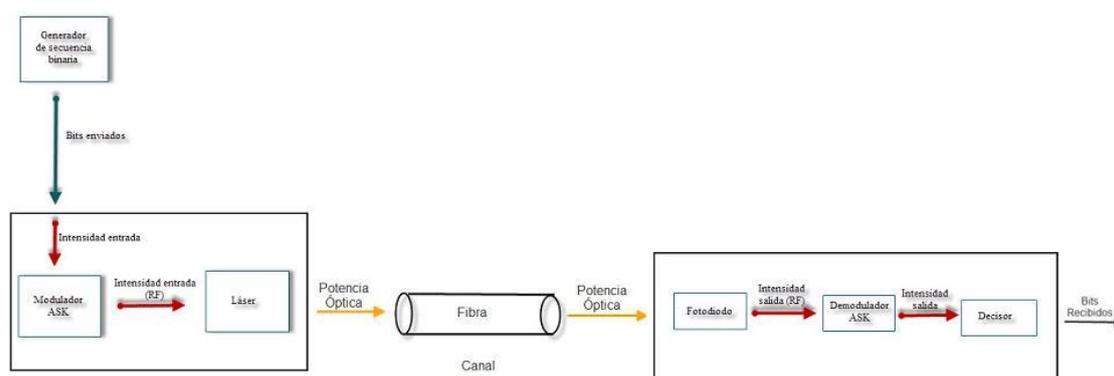


Figura 4.1. Esquema del sistema

4.1. MODULO TRANSMISOR

4.1.1. Introducción

La función que desempeñará el emisor en un sistema digital de radio sobre fibra será la misma que la función que desempeñaba en un sistema digital en banda base, es decir, la de adecuar la señal al medio de transmisión.

En este caso, la principal diferencia reside en los nuevos módulos introducidos para poder realizar la modulación de la señal. Esta modulación tiene como principal objetivo trasladar la señal a aquellas frecuencias en las que dicha señal se comporta de forma óptima para su radiación al medio.

En cuanto al comportamiento y principios que rigen el emisor son los mismos que los desarrollados en la sección 3.1 del presente proyecto.

4.1.2. Conceptos teóricos

4.1.2.1. Modulación paso banda

Como se ha comentado anteriormente, para poder proceder a la radiación de una señal al medio libre es necesario trasladar el espectro de dicha señal a una frecuencia lo suficientemente elevada. El proceso mediante el cual se realiza este traslado de espectro a altas frecuencias se denomina modulación. Las señales cuyo espectro ha sido trasladado a una frecuencia distinta de la suya se denominan señales paso banda.

Las razones de usar señales paso banda son las siguientes:

- Adaptar la señal de información a la banda de frecuencias en las que el canal presenta mejores características, como por ejemplo, una menor atenuación o una menor distorsión.
- Trasladar el contenido espectral de la información a frecuencias suficientemente altas para poder radiar la señal eficientemente con antenas de tamaño razonable.
- Para multiplexar el canal entre varios usuarios, a los cuales se les ha asignado diferentes franjas del espectro.
- Para combatir ruido e interferencias.

La modulación paso banda se realiza en el modulador.

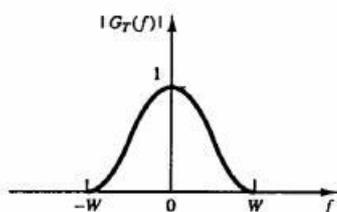


Figura 4.4.1. Señal banda base [26]

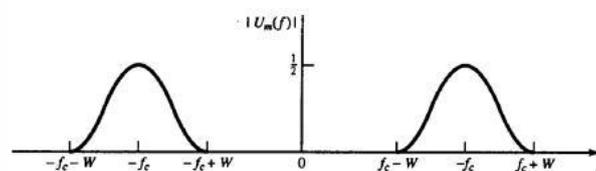


Figura 4.4.2. Señal paso banda [26]

4.1.2.2. Modulador

La función del modulador consiste en trasladar el espectro de la señal de información a altas frecuencias en las que el comportamiento del canal sea óptimo.

Cuando empleamos un láser como fuente luminosa en banda base, es el propio láser quien modula la señal de salida. Sin embargo, cuando nos encontramos en un sistema RoF, se deberá introducir previamente una modulación ASK, la cual se explica en el apartado siguiente.

4.1.2.3. Modulación Amplitude Shift Keying (ASK)

Se trata de una modulación en la cual se representan los datos digitales como variaciones de amplitud de la onda portadora en función de los datos a enviar. La portadora es de tipo sinusoidal y toma dos valores de amplitud, determinada directamente por la señal de datos binaria a su entrada.

Por lo general, el modulador transmite la portadora cuando el bit de datos de entrada es "1" y la suprime por completo cuando el bit de datos de entrada es "0".

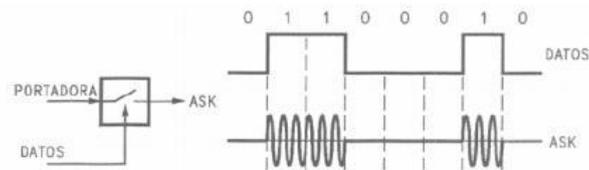


Figura 4.4.3. Modulación ASK [26]

Existen también formas de onda de una modulación ASK en las cuales la amplitud de la señal modulada puede tomar más de dos valores.

Como principal ventaja de la modulación ASK destacaremos que es de fácil implementación, debido a que no requiere componentes complejos.

Como contrapartida, cabe destacar su gran sensibilidad al ruido y a las interferencias.

La modulación ASK puede ser considerada como una modulación PAM a la que se le ha realizado una modulación paso banda.

Hay que reseñar la presencia de otro tipo de modulaciones, entre las que destacamos QAM, PSK o FSK. El estudio de dichas modulaciones queda fuera del presente proyecto.

4.1.3. Módulo transmisor desarrollado en Matlab

En cuanto a la implantación del transmisor desarrollada en Matlab para transmitir señales paso banda cabe destacar que se ha empleado el modelo teórico comentado con anterioridad.

Para ello se ha empleado el módulo transmisor del sistema digital en banda base y se le ha añadido el módulo denominado modulador. Dicho módulo está compuesto por una señal sinusoidal que actuará como portadora de la señal de entrada y recibirá como parámetro de entrada la señal en banda base.

En el código desarrollado es posible seleccionar la frecuencia de la portadora, la cual será la frecuencia central en torno a la que se trasladará el espectro de la señal de información, así como la amplitud de la modulación ASK.

En un principio, el criterio seguido para establecer la amplitud de la modulación ASK, y por lo tanto para la amplitud de la función portadora, ha sido la comentada en el apartado anterior. Se ha establecido que será la unidad para los "1" de la señal de información y nula para los "0".

A continuación se presentan diferentes ejemplos de simulación:

- Frecuencia portadora: 100 kHz

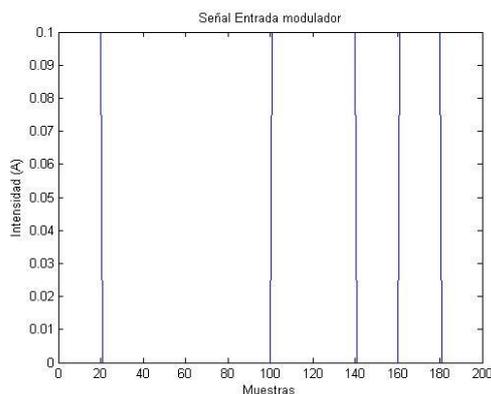


Figura 4.4.4.. Señal entrada modulador

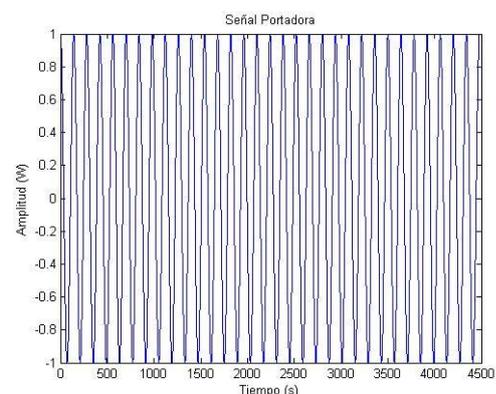


Figura 4.4.5. Señal portadora. $F_c=100$ KHz

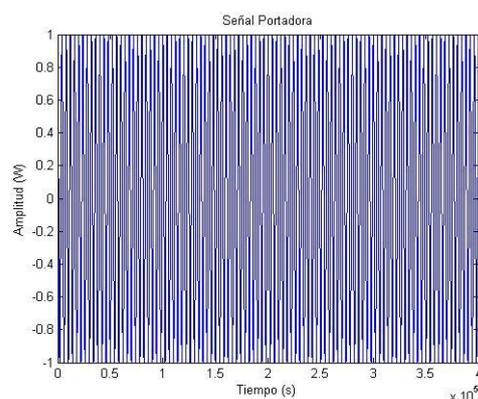


Figura 4.4.6. Señal modulada a 100 KHz

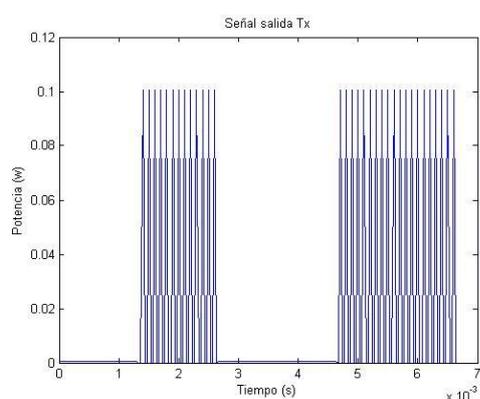


Figura 4.4.7. Salida Tx señal modulada a 100 KHz

- Frecuencia portadora: 1 GHz

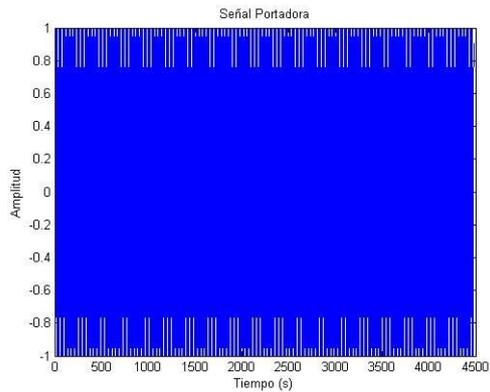


Figura 4.4.8. Señal portadora. $F_c = 1$ GHz

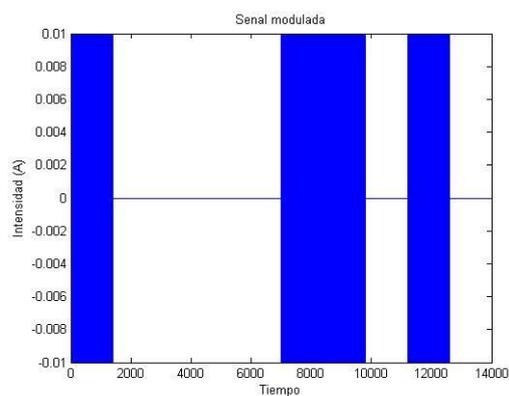


Figura 4.4.9. Señal modulada a 1 GHz

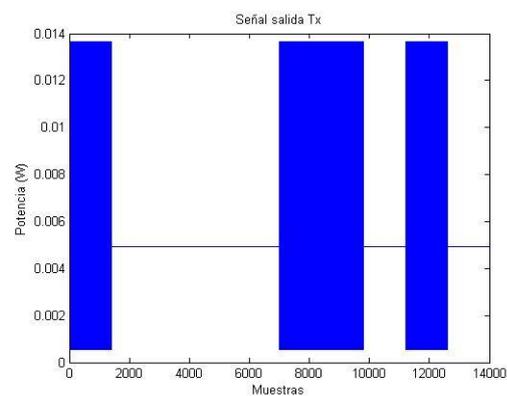


Figura 4.4.10. Salida Tx señal modulada a 1 GHz

A raíz de las secuencias expuestas, podemos concluir que la frecuencia de muestreo empleada en el software desarrollado en Matlab deberá incrementarse dado que habrá que muestrear una portadora de mayor frecuencia que la señal en banda base.

4.2. MÓDULO RECEPTOR

4.2.1. Introducción

Al igual que ocurría con el módulo transmisor, el funcionamiento y el comportamiento del receptor en sí es el mismo que el de un receptor desarrollado para el sistema digital sobre fibra. El modelo de receptor empleado no varía.

Sin embargo, dado que en los sistemas de radio sobre fibra existe una modulación previa para obtener una señal paso banda, será necesario añadir nuevos módulos que reviertan la modulación realizada en el bloque transmisor; esa reversión se conoce con el nombre de demodulación. Una vez realizada la demodulación, se podrá obtener la señal enviada a través de la fibra mediante el empleo de un filtro paso bajo y un decisor.

Para la realización de la demodulación, el filtrado y la toma de decisión es necesario introducir los siguientes módulos en el sistema receptor:

- Demodulador y filtrado paso bajo.
- Decisor.

El proceso de demodulación, filtrado y toma de decisión sobre el símbolo emitido se realiza a partir de la señal proporcionada a la salida del receptor.

Tal y como sucedía en el módulo receptor de un sistema digital sobre fibra, el ruido que perturba la comunicación se calcula y se añade a la entrada del receptor. El cálculo del ruido se realiza exactamente igual que el del sistema digital sobre fibra.

Una vez demodulada y regenerada la señal transmitida se procede a realizar su comparación con la señal a la entrada del sistema para poder calcular y evaluar su tasa de error.

4.2.1.1. Conceptos teóricos

4.2.1.1.1. Demodulación y filtrado paso bajo

El proceso de demodulación se lleva a cabo en el demodulador, y se define como el proceso de reversión de la modulación realizada en el módulo transmisor. Este proceso es necesario para poder obtener una señal de información válida a partir de la cual regenerar la señal transmitida.

El proceso de demodulación cuenta con dos fases: demodulación y filtrado paso bajo.

Demodulación

Consiste en multiplicar la señal obtenida a la salida del receptor por la portadora empleada en la modulación de la señal. Al realizar dicha multiplicación, a partir de las reglas de multiplicación de funciones trigonométricas, obtenemos una señal con dos componentes: la primera está centrada en torno a la frecuencia cero, mientras que la segunda se encuentra desplazada a una frecuencia igual al doble de la frecuencia de la portadora.

Para obtener la envolvente de la señal, nos interesa poder analizar únicamente la componente de la señal centrada en la frecuencia nula.

Filtrado paso bajo

Dado que la componente que queremos aislar y analizar se encuentra centrada en torno a la frecuencia nula, será necesario emplear un filtro paso bajo. El objetivo del filtro paso bajo reside en eliminar la componente situada al doble de la frecuencia de la portadora y dejar la componente centrada en torno a la frecuencia nula. Se puede incluir una compensación de la amplitud para restaurar el nivel que tenía anteriormente.

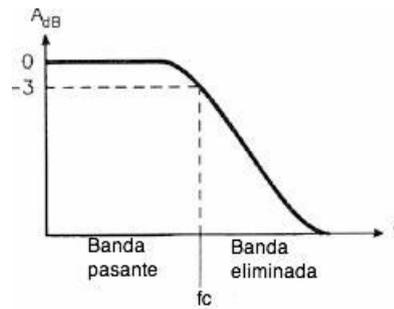


Figura 4.4.11. Filtro paso bajo [26]

La señal filtrada se recibirá como parámetro de entrada en el decisor, al igual que en el sistema digital.

4.2.1.1.2. Decisor

El principio de funcionamiento es igual al del decisor empleado en el sistema digital de comunicaciones.

4.2.2. Módulo receptor desarrollado en Matlab

Para la realización del proyecto se ha considerado que el modulo receptor incluye tanto la etapa de conversión óptico-eléctrica como las posteriores etapas de demodulación, filtrado y decisor, constituyéndose cada etapa en un bloque separado e independiente.

El bloque empleado para la conversión óptico-eléctrica (bloque fotodetector) ha sido el mismo que el empleado para el sistema digital sobre fibra, ya que la diferenciación de ambos sistemas se produce una vez ha sufrido la conversión la señal.

Los bloques implementados en esta sección para el sistema de radio sobre fibra han sido el demodulador y el filtro paso bajo. El decisor empleado es el mismo que en el sistema digital comentado en apartados anteriores.

El bloque demodulador se basa en la multiplicación de la señal de salida del fotodetector por la señal portadora empleada en la modulación.

El segundo bloque desarrollado es el filtro paso bajo. Para ello definimos el ancho de banda a filtrar e indicamos que todo componente espectral de la señal que esté por debajo de una determinada frecuencia permanezca inalterado, mientras que toda aquella componente espectral de la señal situada por encima de dicha frecuencia será puesta a valor nulo.

Por último, se ha procedido a la implementación del decisor. El planteamiento para el desarrollo del decisor ha sido el siguiente:

En primer lugar se fija el instante de decisión a mitad de periodo de símbolo. Una vez fijado el instante de muestreo se registrará el valor de la señal filtrada en dicho instante.

El último paso a realizar en el decisor consistirá en regenerar la señal a partir de los valores obtenidos en el instante de decisión mediante el empleo de un valor umbral. Si el valor a mitad de periodo de símbolo es mayor que el umbral se considera que se ha enviado un "1", de lo contrario se considera que es un "0".

El valor del umbral se obtiene a través de los resultados obtenidos en el diagrama de ojos para una señal piloto enviada previamente a través del sistema.

En el código implementado se podrán definir y variar los parámetros relativos a la frecuencia de corte del filtro y el valor del umbral del decisor.

Una vez se tiene la señal regenerada se procederá a compararla con la señal original enviada y a evaluar el número de símbolos erróneos obtenidos, y obtener así la tasa de error o BER.

A continuación se presenta una secuencia de demodulación, filtrado, decisor y regeneración de la señal desde la salida del fotodetector:

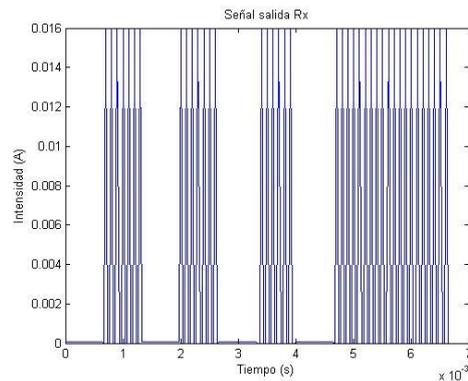


Figura 4.4.12. Señal salida Rx PIN

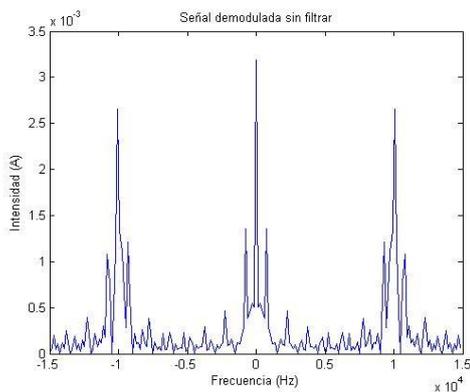


Figura 4.4.13. Señal demodulada sin filtrar
dominio frecuencial

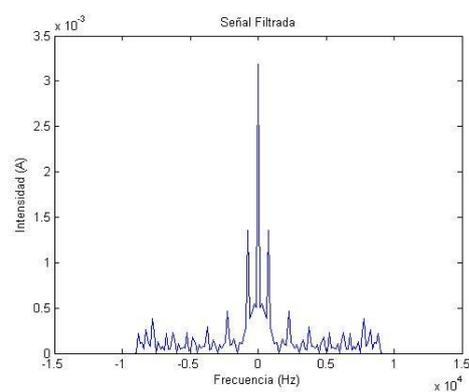


Figura 4.4.14. Señal demodulada filtrada
dominio frecuencial

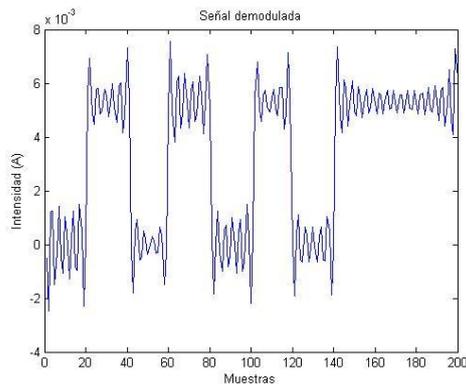


Figura 4.4.15. Señal demodulada filtrada
Dominio temporal

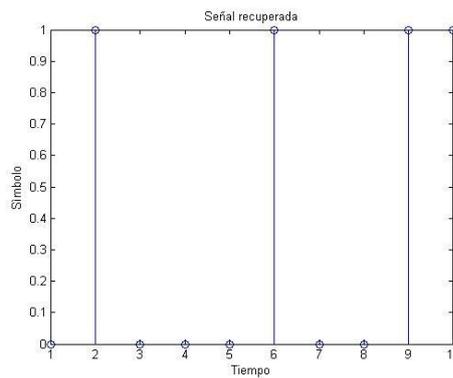


Figura 4.4.16. Señal recuperada

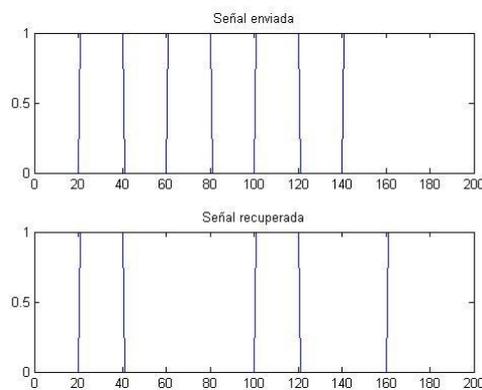


Figura 4.4.17. Comparativa señal enviada vs recuperada

En este caso, en el proceso de decisión ha habido tres errores, decidiéndose de forma incorrecta el símbolo enviado. Esto es debido a que el umbral escogido no era el óptimo y en los casos límite ha decidido erróneamente.

El mismo ejemplo se repitió con un umbral más ajustado, la tasa de error cometida fue nula y se consiguió regenerar la misma señal que se había enviado.

5. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL SOBRE FIBRA ÓPTICA IMPLEMENTADO EN MATLAB

El objetivo de este apartado reside en la evaluación del modelo de sistema digital sobre fibra óptica desarrollado en Matlab. Dicha evaluación consistirá en la realización de una batería de pruebas ideadas para comprobar el funcionamiento de los diferentes módulos que componen el sistema (transmisor, canal y receptor) y de cómo afecta la variación de parámetros en los mismos en la totalidad del conjunto.

Para poder comenzar a realizar las pruebas es necesario asegurarse de que el sistema implementado en Matlab reporta resultados fiables y correctos. Por ello es necesario realizar una prueba básica de funcionamiento, en la cual se comparen los resultados obtenidos mediante Optilux como con el software desarrollado en Matlab. Para poder comparar los resultados obtenidos es necesario realizar la misma prueba en ambos escenarios, es decir, propagar la misma secuencia con las mismas condiciones de transmisor, canal y receptor.

5.1. REALIZACIÓN DE PRUEBA BÁSICA DE FUNCIONAMIENTO

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de esta prueba reside en comprobar que ambos sistemas, Optilux y Matlab, reportan los mismos resultados ante un mismo caso en igualdad de condiciones de transmisión, propagación y recepción.

En primer lugar se ha definido una secuencia de tipo PAM binaria de 32 bits, en la que cada símbolo corresponde con un bit. La secuencia transmitida en ambos sistemas ha sido:

Secuencia binaria: "1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1".

Su representación gráfica es la siguiente:

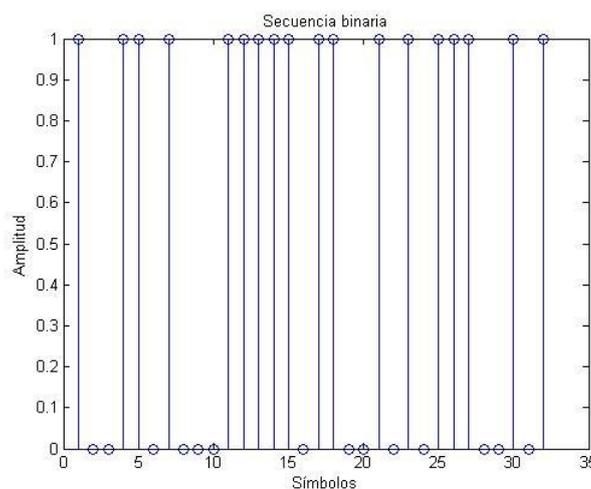


Figura 5.1. Secuencia binaria

La secuencia binaria anterior se transmitirá a través de un sistema compuesto por un transmisor lineal, un enlace de fibra óptica de 40 km, cuya atenuación es de 0.2 dB/Km, y un

receptor ideal. Entendemos por dispositivo ideal aquellos que no introducen alteración alguna adicional a la señal (ruido, distorsión, etc.) provocando la degradación de la misma.

A continuación se muestran los resultados obtenidos al atravesar la señal los diferentes componentes del sistema. La señal introducida en el sistema presenta una intensidad de pico de 100 mA.

Transmisor

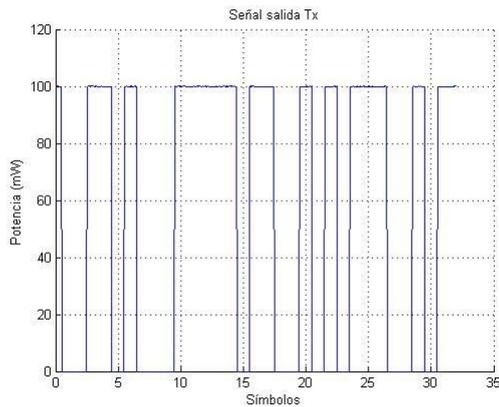


Figura 5.2. Salida Tx Optilux

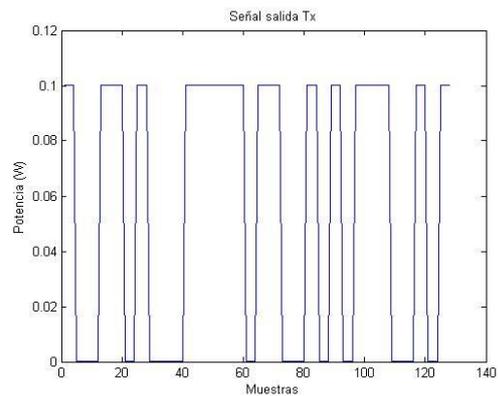


Figura 5.3 Salida Tx Matlab

Como se puede apreciar, la señal a la salida de ambos transmisores es idéntica. Se trata de un transmisor lineal de pendiente unidad.

Canal

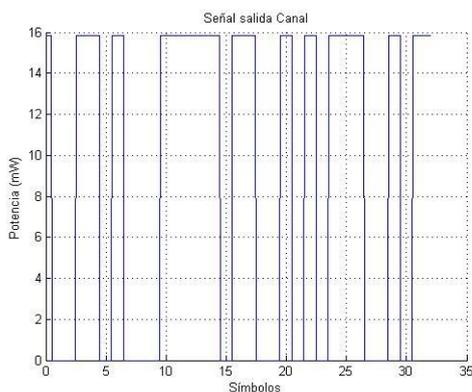


Figura 5.4. Señal a la salida del canal en Optilux
 $D=40\text{ Km}$, Tercera ventana ($\alpha=0.2\text{ dB/Km}$)

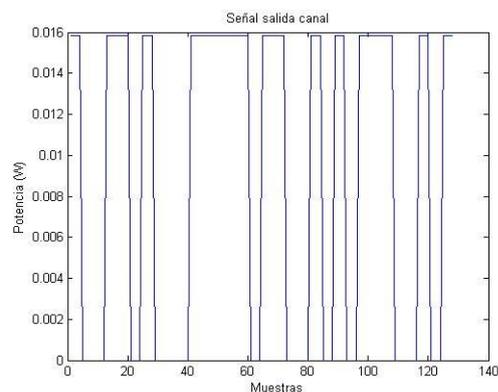


Figura 5.5. Señal a la salida del canal en Matlab
 $D=40\text{ Km}$, Tercera ventana ($\alpha=0.2\text{ dB/Km}$)

La atenuación sufrida en ambos sistemas ha sido la misma y queda reflejado en que ambas señales, tanto la procedente del canal simulado en Optilux como el implementado en Matlab, presentan el mismo aspecto y valores de potencia.

Receptor

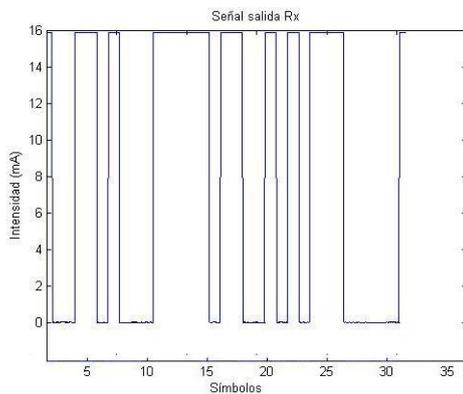


Figura 5.6. Salida Rx Optilux

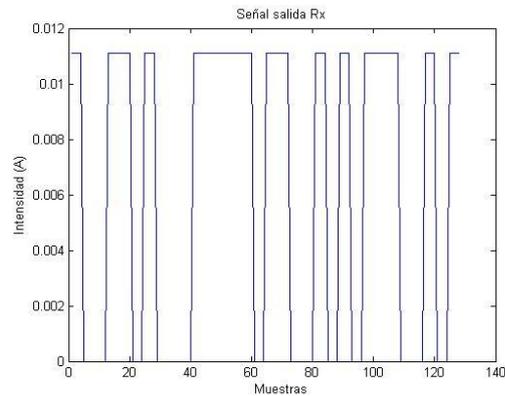


Figura 5.7. Salida Rx Matlab

Por último, se puede apreciar que las señales obtenidas a la salida de ambos sistemas son idénticas entre sí.

Esta misma prueba ha sido repetida variando parámetros tales como el nivel de potencia de la señal de entrada, la longitud del enlace de fibra y la atenuación de la misma, para simular diferentes entornos. En todas ellas se han obtenidos las mismas señales, tanto para el software desarrollado por Optilux como el implementado en Matlab.

Con esta batería de pruebas básicas se puede concluir que queda probada la efectividad del código desarrollado en Matlab para simular un sistema de comunicación digital sobre fibra óptica.

5.2. EVALUACIÓN DEL EMPLEO DE DIFERENTES TRANSMISORES

Como se ha comentado previamente en el capítulo relativo a transmisores, distinguimos entre aquellos que emplean diodos LED, como fuente generadora de luz, y los que emplean diodos láser. Como también se comentó, se identifica el diodo LED como un transmisor lineal debido a que presenta una curva característica de P-I lineal, mientras que el diodo láser presenta una curva sigmoideal, por lo que se le identifica como transmisor no lineal.

Las pruebas presentadas a continuación se realizaron sobre los transmisores implementados en Matlab y pretenden evaluar el impacto en el sistema del empleo de un tipo de transmisor u otro. Dicha comparación se ha realizado a nivel de salida de los transmisores, es decir, comparando las señales a las salidas de los mismos, así como sus diagramas de ojos.

Los parámetros que se pueden variar tanto en el transmisor lineal como en el no lineal, y los cuales han sido modificados en diferentes pruebas para observar su influencia en los mismos, son: corriente de saturación (I_{sat}), corriente de polarización (I_{bias}), potencia de saturación (P_{sat}), el coeficiente de acoplamiento a la fibra (η_c) y, en el caso del transmisor no lineal, la corriente umbral (I_{th}).

5.2.1. Transmisor lineal

El transmisor lineal no presenta corriente umbral alguna, por lo que el parámetro a modificar en la pruebas a tener en cuenta será la corriente de polarización. Existen cuatro posibles situaciones:

- La corriente de entrada es superior a la de saturación.
- La corriente de polarización se encuentra próxima a la corriente de saturación. Posible saturación superior.
- La corriente de polarización se encuentra próxima al límite inferior de la curva lineal. Posible saturación inferior.
- La corriente de polarización se sitúa entre ambos extremos, de tal forma que la señal de entrada no sature ni superior ni inferiormente.

A continuación se muestra la curva P-I del transmisor lineal:

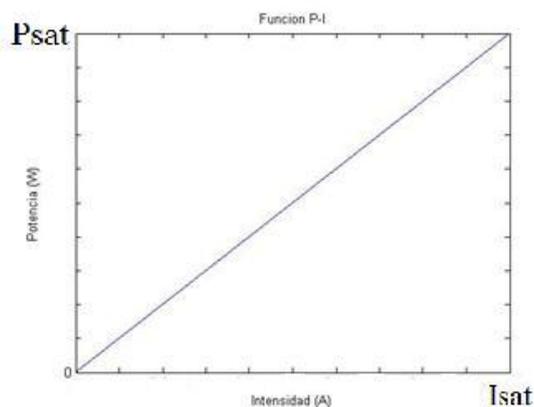


Figura 5.8. Curva P-I transmisor lineal

Las pruebas realizadas han evaluado las diferentes situaciones.

Para poder realizar una comparativa a nivel de señal transmitida, se ha establecido una secuencia de bits comunes a transmitir en todas las pruebas realizadas. La secuencia de bits empleada en todas las pruebas es la siguiente:

Secuencia binaria: “1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1”

Su representación gráfica es la siguiente:

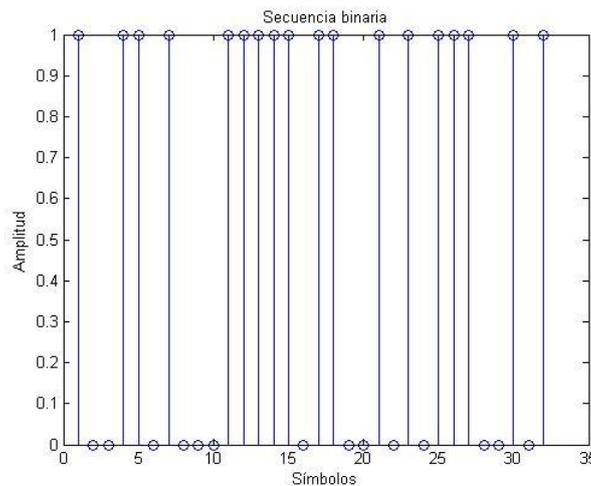


Figura 5.9. Secuencia binaria transmitida en todas las pruebas

Corriente de polarización superior a la de saturación

Para evaluar el efecto de la saturación se ha establecido un transmisor con una corriente de saturación de 100 mA, una potencia de saturación de 100 mW y una corriente de polarización de 0.5 mA. La señal de entrada presentará una intensidad de pico de 120 mA.

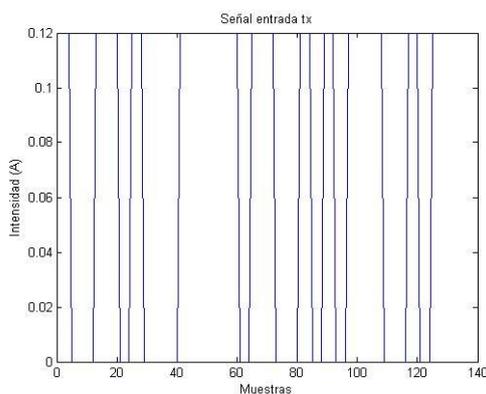


Figura 5.10. Señal entrada Tx. $I_e = 120 \text{ mA}$

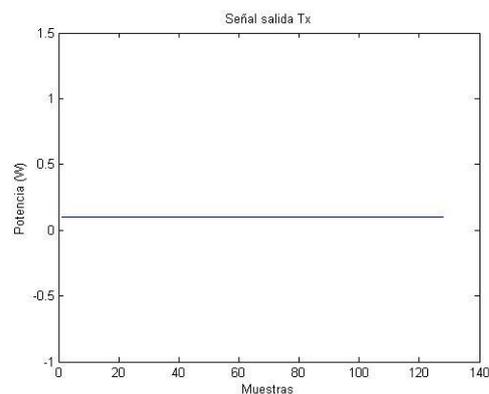


Figura 5.11. Señal salida Tx. $P_{sat} = 100 \text{ mW}$

Independientemente del valor de la corriente de polarización, la señal siempre saturará debido a que la intensidad de la señal de entrada es siempre superior a la de saturación.

Corriente de polarización próxima a la corriente de saturación

En este caso se ha empleado una señal de entrada con una intensidad de pico de 40 mA y se ha establecido la corriente de saturación en 100 mA y una potencia de saturación de 100 mW. Dado que nos interesa probar la saturación superior de la señal, estableceremos una corriente de polarización de 80 mA.

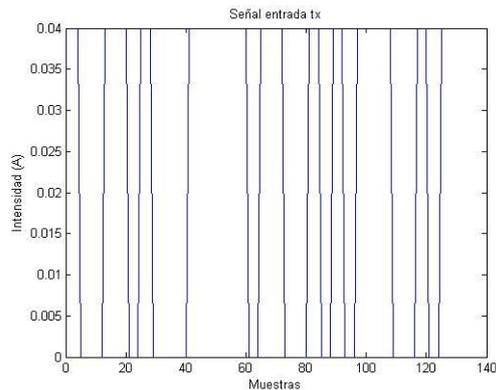


Figura 5.12. Señal entrada Tx lineal. $I_e = 40 \text{ mA}$

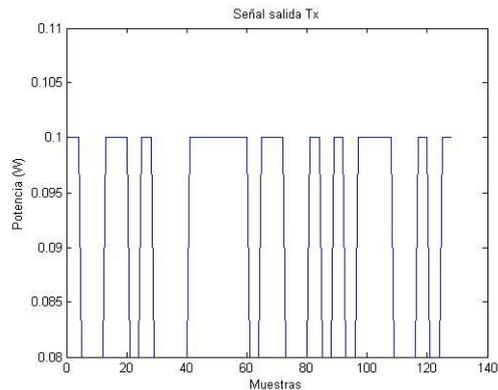


Figura 5.13. Señal salida Tx lineal. $P_{sat} = 100 \text{ mW}$

Como se puede apreciar, la señal de salida presenta una potencia igual a la de saturación, esto es debido a que el valor de entrada más el valor de la corriente de polarización supera el valor de la corriente de saturación.

Si la corriente de saturación hubiese sido mayor y la señal de entrada no hubiese saturado habría presentado a su salida una potencia de 120 mW.

Podemos observar cómo la señal satura por el límite superior, teniendo en cuenta que el valor mínimo de intensidad de la señal de entrada más el valor de la corriente de polarización no supera al de la corriente de saturación y, por lo tanto, no satura.

Al situar la corriente de polarización próxima a la de saturación estamos disminuyendo el número de valores positivos posibles de la señal que no entrarán en la región de saturación.

Corriente de polarización próxima al origen de la curva P-I

En este caso no se producirá una saturación por el límite inferior porque al tratarse de una secuencia del tipo PAM binaria, cuyos valores pueden ser "1" o "0", siempre se estará por encima del origen de la curva característica P-I. Ese efecto se podrá observar en las pruebas realizadas en la evaluación del sistema RoF, ya que la señal PAM binaria se encuentra modulada por un seno y, por lo tanto, sí presentará regiones de la señal que estén por debajo del límite inferior de la curva P-I.

Corriente de polarización situada entre la corriente de saturación y el origen de la curva P-I

Esta es la situación óptima y la que siempre se intentará conseguir, teniendo en cuenta que la totalidad de la señal se encuentra en la zona lineal y la señal, a la salida, no presentará saturación alguna.

Para conseguir "centrar" la señal de entrada en la región lineal de la curva característica del transmisor, es necesario establecer correctamente el valor de la corriente de polarización (I_b) en función de los valores máximo y mínimo de la señal de entrada y de la corriente de saturación.

Para esta prueba se ha empleado la señal de la prueba anterior, cuyos datos eran:

- Potencia de saturación (P_{sat}) = 100 mW
- Intensidad de saturación (I_{sat}) = 100 mA
- Intensidad máxima de la señal de entrada (I_e) = 40 mA
- Corriente de polarización (I_b) = 35 mA

En este caso, el valor de la corriente de polarización podría haber sido cualquiera inferior a 60 mA, puesto que sería el valor límite para no superar la región de saturación.

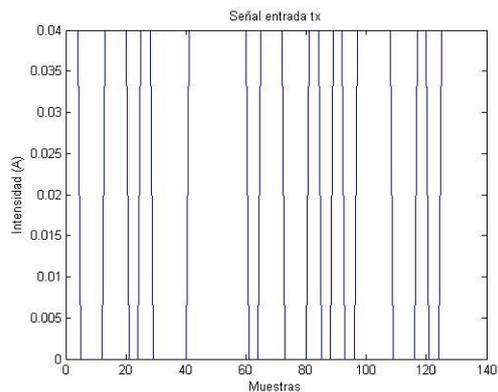


Figura 5.14. Señal entrada Tx. $I_e=40$ mA, $I_b=35$ mA

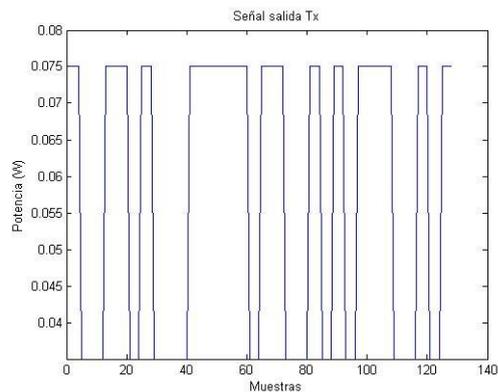


Figura 5.15. Señal salida Tx. $P_{out}=75$ mW

Podemos observar cómo la señal no satura en ningún momento y mantiene su rango de amplitud.

La principal ventaja de ajustar la corriente de polarización reside en el rango de la amplitud de la señal de salida. Si la señal de salida no ha sufrido saturación su rango de amplitudes es más amplio y, por lo tanto, los valores asociados al "1" y al "0" se mantendrán más distantes, y a la hora de recuperar la señal, con presencia de ruido, resultará más sencillo identificarlos.

Este efecto lo podemos apreciar en los diagramas de ojos:

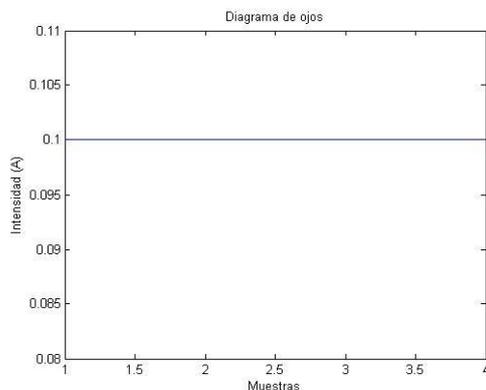


Figura 5.16. Diagrama de ojos señal saturada

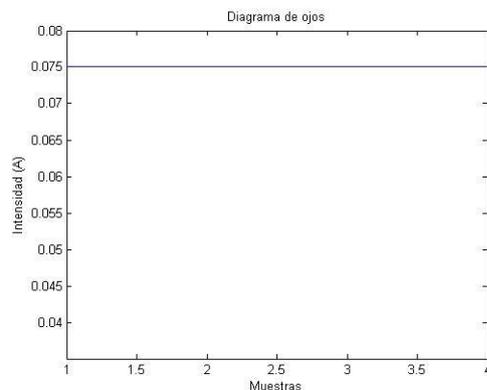


Figura 5.17. Diagrama de ojos señal no saturada límite superior

Como se puede apreciar, la diferencia entre la amplitud asociada al "0" y la asociada al "1", en el caso de la señal saturada, es inferior a la diferencia entre amplitudes en la señal no saturada, más concretamente, la diferencia entre amplitudes de la señal saturada es de 20 mA, mientras que en el caso de la señal no saturada esta diferencia asciende a 40 mA.

5.2.2. Transmisor no lineal

A la hora de hablar del transmisor no lineal debemos incluir un nuevo parámetro a tener en cuenta. Este nuevo parámetro es la corriente umbral de funcionamiento y es a partir de la cual el transmisor comienza a funcionar en la zona sigmoideal o no lineal.

Cuando la corriente de entrada no es superior a la corriente umbral, el transmisor se encuentra en la zona de régimen lineal y su salida es similar a la de un transmisor lineal. Las situaciones planteadas para realizar las pruebas de este transmisor son:

- La corriente de entrada es superior a la de saturación.
- La corriente de polarización se encuentra próxima a la corriente de saturación. Posible saturación superior.
- La corriente de polarización se encuentra próxima a la corriente umbral. Posible saturación inferior.
- La corriente de polarización se encuentra situada entre la corriente de saturación y la corriente umbral.

Como se ha comentado anteriormente, la secuencia binaria empleada para la realización de las pruebas es la proporcionada en la anterior sección.

Corriente de entrada superior a la de saturación

Esta situación es análoga a la descrita para el transmisor lineal y su comprobación es exactamente idéntica. Los resultados obtenidos para el transmisor lineal son extrapolables al transmisor no lineal.

Corriente de polarización próxima la corriente de saturación

La principal diferencia de este caso con el del transmisor lineal la encontramos en que al no ser la curva característica P-I una función lineal sino una sigmoide, los valores de intensidad de la señal que no traspasen la región de saturación tendrán su correspondencia en potencia según dicha función.

Para la realización de la prueba se ha establecido una corriente umbral de 20 mA, una corriente de saturación de 100 mA, una corriente de polarización de 80 mA y una potencia de saturación de 150 mW.

La señal de entrada presenta un valor de pico de 40 mA y un valor mínimo de 0 mA.

Dados los parámetros anteriores, la curva característica P-I presenta la siguiente forma:

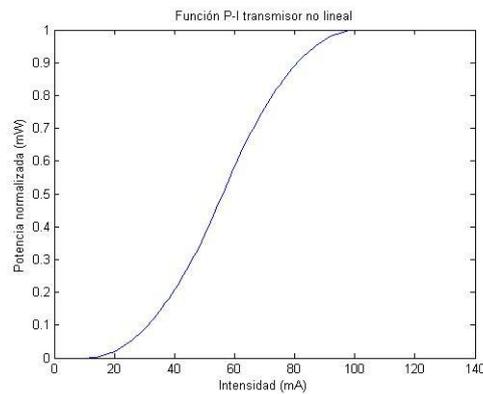


Figura 5.18. Curva P-I transmisor no lineal

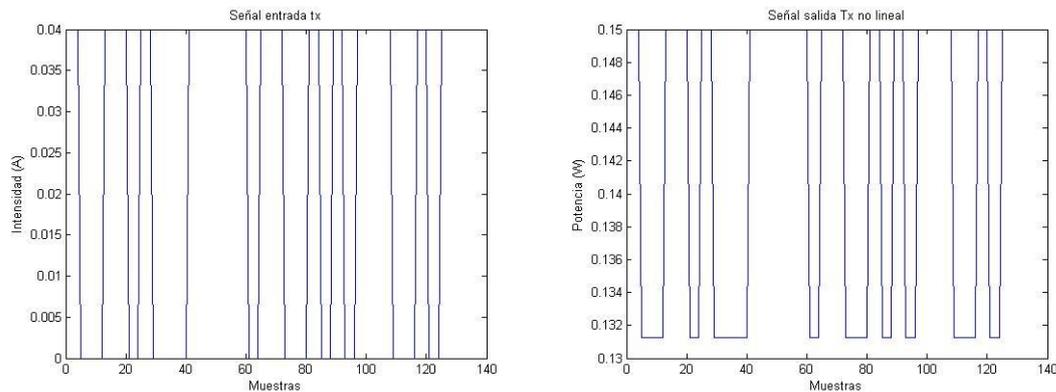


Figura 5.19. Señal entrada Tx no lineal. $I_b=80$ mA Figura 5.20. Señal salida Tx no lineal. $P_{sat}=150$ mW

Como se puede apreciar, los valores correspondientes a los máximos de la señal de entrada se encuentran en la región de saturación, mientras que los mínimos se encuentran en la región no lineal. Esto origina a la salida del transmisor una señal saturada en los máximos.

Corriente de polarización próxima a la corriente umbral

Al situar la corriente de polarización próxima a la de umbral puede darse el caso de que los valores mínimos de la señal no consigan sobrepasar la corriente umbral y permanezcan en la zona lineal.

Como sucedía en el apartado del transmisor lineal, al tratarse de una señal digital PAM binaria cuyos valores oscilan entre el "1" y el "0", este caso nunca sucederá, ya que si la corriente de polarización está por encima de la corriente umbral los valores mínimos de la señal siempre estarán por encima de dicho valor.

Este efecto se apreciará en las pruebas realizadas en el apartado de evaluación de un sistema RoF, puesto que la señal de entrada se encuentra modulada por un coseno.

Corriente de polarización situada entre la corriente umbral y la de saturación

Al igual que en el caso del transmisor lineal, nos interesará que la corriente de polarización esté situada entre la umbral y la de saturación, de tal forma que el mayor número posible de valores de la señal de entrada se encuentre en la región no lineal de la curva P-I.

Emplearemos los mismos valores que en la prueba realizada para el mismo caso en el transmisor lineal, y poder así observar las diferencias. Los parámetros empleados para la realización de la prueba son:

- $P_{sat} = 100 \text{ mW}$
- $I_{sat} = 100 \text{ mA}$
- $I_e = 40 \text{ mA}$
- $I_b = 35 \text{ mA}$

En este caso, el valor de la corriente de polarización podría haber sido cualquiera inferior a 60 mA y superior a 20 mA, teniendo en cuenta que sería el valor límite para no superar la región de saturación y siempre estaríamos por encima de la corriente umbral.

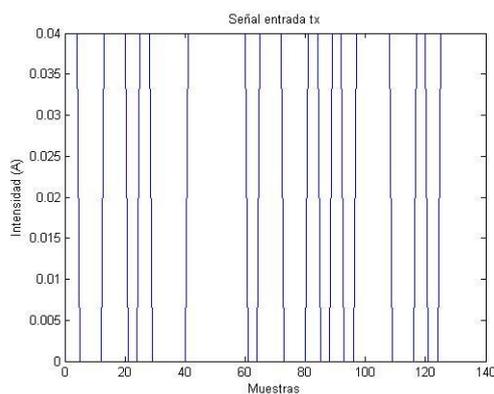


Figura 5.21. Señal entrada Tx no lineal. $I_b=35 \text{ mA}$

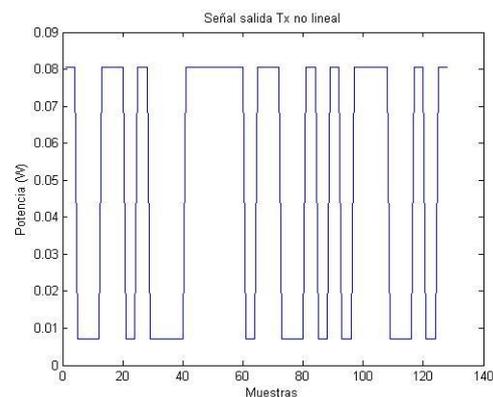


Figura 5.22. Señal salida Tx no lineal

Al observar la gráfica correspondiente a la señal de salida del transmisor no lineal, observamos que no se ha producido saturación alguna y que se ha incrementado la diferencia de amplitudes entre los valores asociados al "1" y al "0" respecto a los casos anteriores.

Análisis comparativo entre el transmisor lineal y no lineal

La comparación se ha centrado principalmente en el caso en que ambos actúan en la región característica de su curva P-I, es decir, en la región lineal y no lineal. Para realizar dicha comparación se ha procedido a evaluar la apertura de la señal de salida, esto es, la separación entre los valores asignados al "1" y al "0", mediante el diagrama de ojos asociado a cada transmisor.

Las figuras evaluadas corresponden a los casos en que la corriente de polarización se sitúa de tal forma que la señal de entrada abarque la zona de trabajo de interés de ambas curvas P-I. Todos los parámetros de entrada son iguales en ambos casos.

Transmisor Lineal:

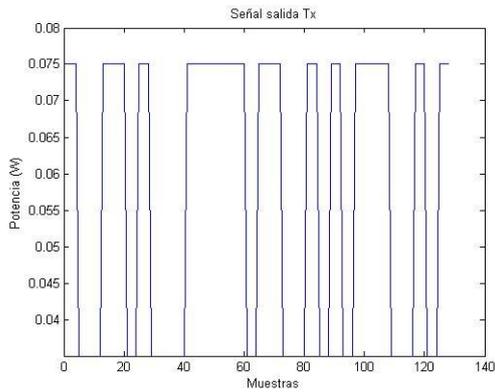


Figura 5.23. Salida Tx lineal. $I_b = 35 \text{ mA}$. $I_e = 40 \text{ mA}$.

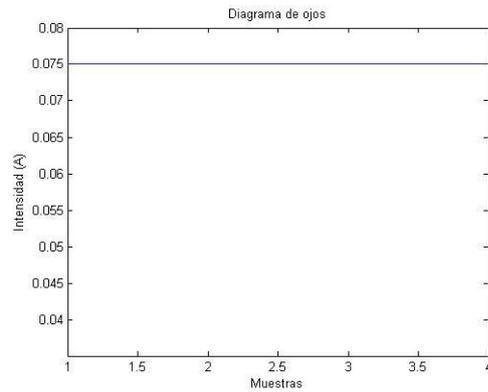


Figura 5.24. Diagrama de ojos salida Tx lineal

Transmisor no lineal:

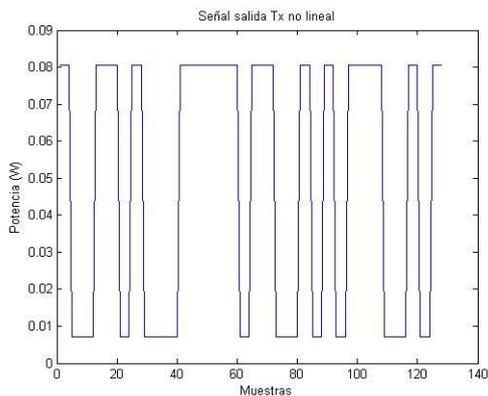


Figura 5.25. Salida Tx no lineal. $I_b = 35 \text{ mA}$. $I_e = 40 \text{ mA}$.

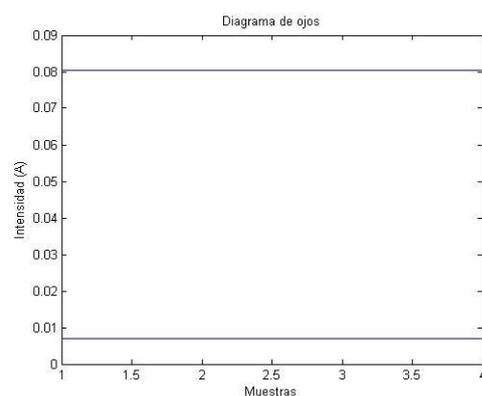


Figura 5.26. Diagrama de ojos salida Tx no lineal

Al realizar la comparativa, observamos ambas señales presentan un rango de amplitud similar.

Dado que la curva característica del transmisor lineal se rige, como su propio nombre indica, por una función lineal, a la salida del mismo siempre se observará el mismo rango de amplitud desplazado en función de la corriente de polarización.

Este hecho no sucederá, en cambio, en el transmisor no lineal, debido a que su curva característica se rige por una función sigmoideal.

También apreciamos que para una misma señal se produce una salida de mayor potencia en el caso del transmisor no lineal, hecho que se podrá aprovechar cuando la misma señal sufra atenuación y ruido al continuar por el sistema de comunicación.

Existe también un parámetro de comparación a tener en cuenta denominado “extinction ratio”, el cual se define como el cociente entre la amplitud (potencia) máxima y mínima de la señal de salida del transmisor.

El valor ideal del mismo, y el cual emplea Optilux en su transmisor ideal, sería infinito, porque eso significaría que la amplitud mínima de la señal, en este caso asociada al “0”, sería cero, o que la diferencia de amplitudes fuese realmente alta.

Sin embargo, ese valor sólo se puede obtener en los casos ideales. Para obtener valores razonablemente buenos (altos) de “extinction ratio” es necesario situar la corriente de polarización muy próxima al origen de la curva característica, hecho muy difícil de conseguir en los transmisores reales.

5.3. EVALUACIÓN DEL CANAL

En este apartado se deberá realizar una separación entre el canal implementado en Matlab y el desarrollado por Optilux. Pese a que el motivo de evaluación es el software desarrollado en Matlab, se ha creído conveniente mostrar también el funcionamiento del canal en Optilux por introducir factores adicionales a la atenuación, como son los efectos no lineales de la fibra o la dispersión cromática.

5.3.1. Canal implementado en Matlab

En el canal implementado en Matlab como medio de transmisión para el sistema de comunicaciones creado, simula un enlace de fibra óptica. Dicho canal simula la atenuación sufrida por una señal que se propaga a través del mismo.

Para realizar la evaluación del canal se han considerado como señales de entrada procedentes de los transmisores del apartado anterior. Más concretamente, la señal procedente del caso en el que la señal de salida no sufre saturación alguna en el transmisor no lineal.

En los transmisores anteriores existe un parámetro denominado coeficiente de acoplamiento, mediante el cual un valor comprendido entre el “0” y el “1” define la cantidad de potencia de la señal de salida que consigue ser acoplada a la fibra.

Los parámetros a tener en cuenta en la evaluación del canal son la longitud del enlace y la atenuación por unidad de longitud de la fibra.

Para la realización de la prueba se ha fijado primero una distancia y se ha ido incrementando el valor de la constante de atenuación y, posteriormente, se ha fijado una constante de atenuación y se ha procedido a incrementar la distancia del enlace.

La señal empleada a la entrada del canal es la siguiente:

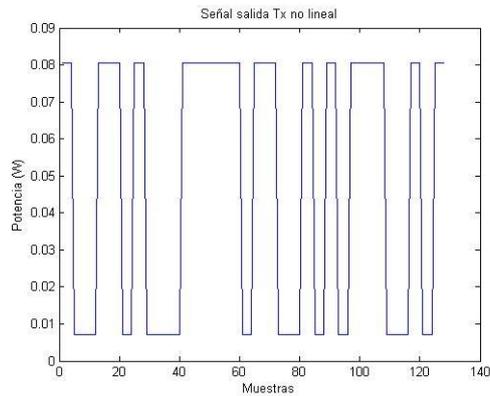


Figura 5.27. Señal entrada canal. $P_{pico} = 80.5 \text{ mW}$

Distancia fijada en 80 kilómetros

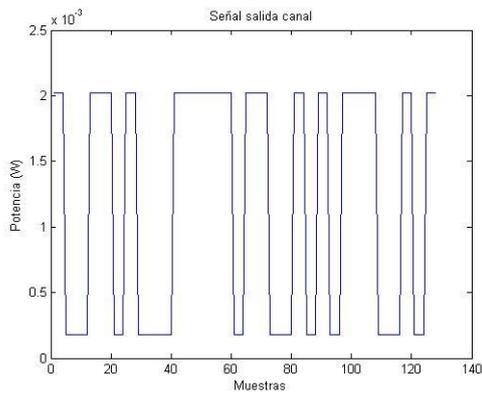


Figura 5.28. Señal salida canal. $\alpha = 0.2 \text{ dB}$

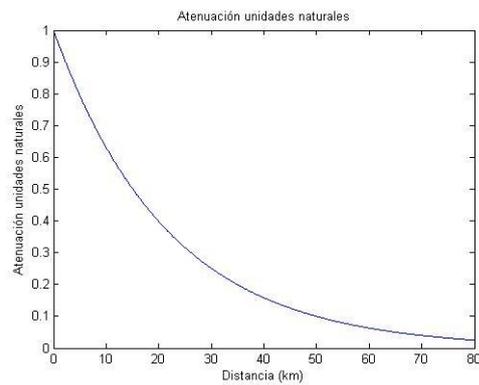


Figura 5.29. Atenuación vs distancia. $\alpha = 0.2 \text{ dB}$

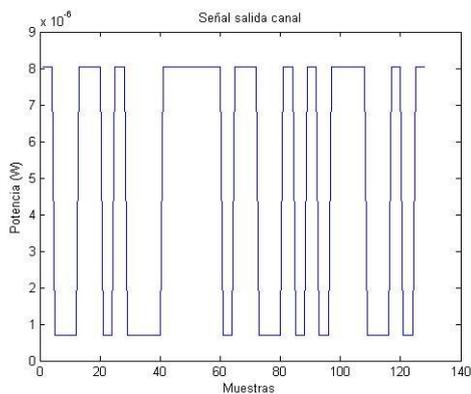


Figura 5.30. Señal salida canal. $\alpha = 0.5 \text{ dB}$

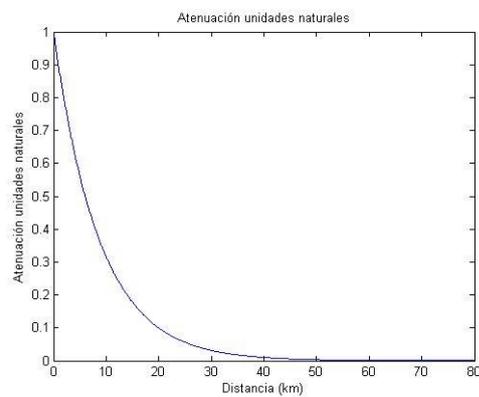


Figura 5.31. Atenuación vs distancia. $\alpha = 0.5 \text{ dB}$

En la secuencia de imágenes anteriores podemos apreciar cómo se degrada la señal para una misma distancia incrementando el coeficiente de atenuación de la fibra.

Para $\alpha=0.2$ dB/Km se observa que a una distancia de 80 Km se ha aplicado una atenuación de 16 dB.

La señal de entrada presentaba una potencia de pico de 80.5 mW, una potencia mínima de 7 mW y una potencia media de 48.3 mW, mientras que la señal a la salida mostraba unas potencias de pico, mínima y media de 2mW, 0.17 mW y 1.2 mW, respectivamente.

Sin embargo, para $\alpha=0.5$ dB/Km, observamos que para la distancia indicada la atenuación aplicada a la señal es mucho mayor, concretamente es de 40 dB, es decir, se ha reducido en 4 el orden de magnitud de la señal de entrada. Esto significa que a la salida del canal, la señal presentará un rango de amplitud muy limitado.

Constante de atenuación fijada en $\alpha=0.3$ dB/Km

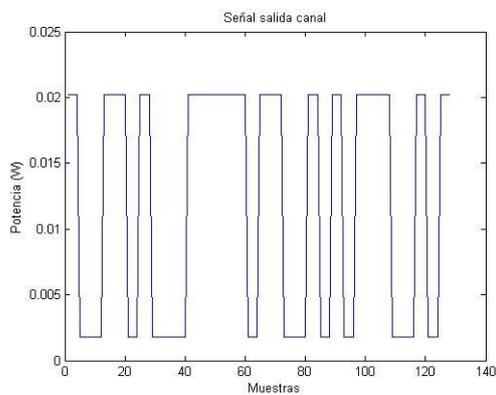


Figura 5.32. Señal salida canal. $D= 20$ Km

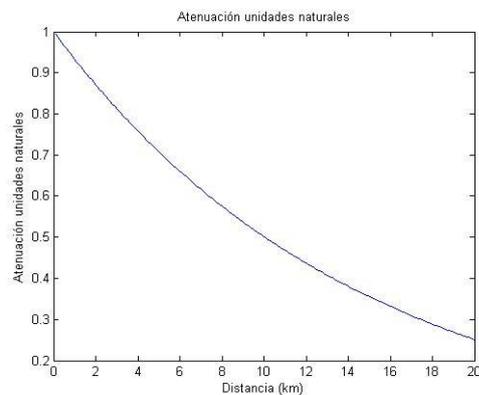


Figura 5.33. Atenuación vs distancia. $D=20$ Km

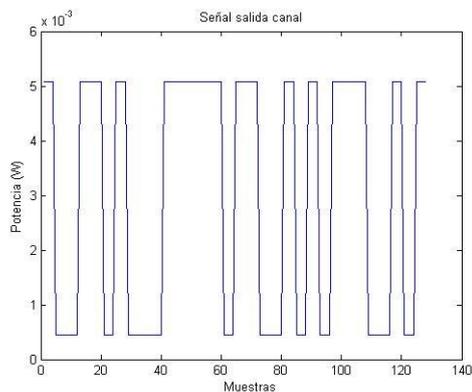


Figura 5.34. Señal salida canal. $D= 40$ Km

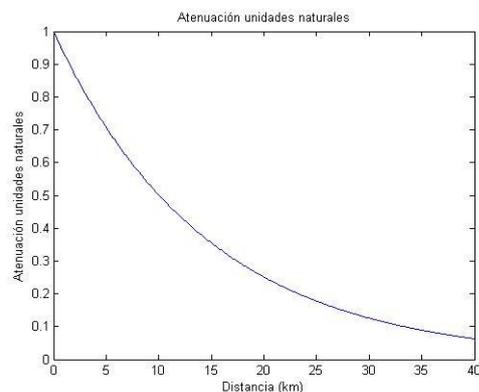


Figura 5.35. Atenuación vs distancia. $D=40$ Km

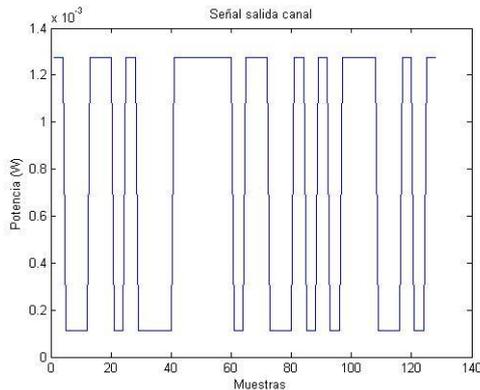


Figura 5.36. Señal salida canal. D= 60 Km

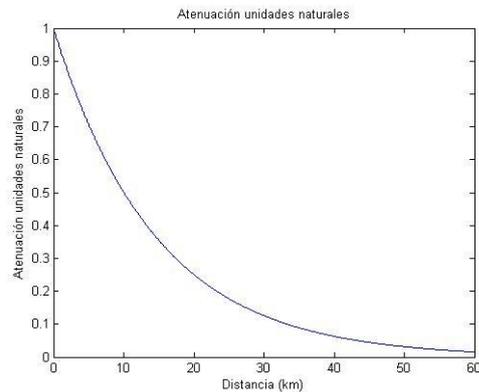


Figura 5.37. Atenuación vs distancia. D=60 Km

Al observar las gráficas obtenidas podemos apreciar que el hecho de fijar la constante de atenuación e ir variando la longitud del enlace nos proporciona, principalmente en la gráfica en la que se contraponen los valores de atenuación y distancia, información sobre la distancia límite que se podrá alcanzar con la fibra cuya constante de atenuación es 0.3.

Al comparar este caso con el anterior en el que fijábamos la distancia e incrementábamos la constante de atenuación, apreciamos que dicha constante es un factor más restrictivo que la propia distancia del enlace. Sin embargo, este parámetro viene fijado por la fibra y su valor no podrá ser modificado. Se deberá escoger aquella fibra que mejor se adapte a las prestaciones que necesitemos, es decir, aquella que nos permita operar en la tercera ventana (longitudes de onda del orden de 1550 nm) ya que es la que presenta una menor atenuación.

5.3.2. Canal desarrollado por Optilux

Dado que ya se visualizó el efecto de la atenuación en el canal desarrollado por Optilux en la prueba básica de funcionamiento, las pruebas de este apartado van destinadas a mostrar los efectos no lineales y la dispersión cromática.

En la primera prueba se verifica el efecto de la dispersión cromática en la fibra óptica, para ello se procederá a variar el coeficiente de dispersión cromática y se evaluarán los efectos de dichas variaciones.

Para la realización de las pruebas no se han empleado los valores típicos, puesto que para dichos valores los efectos apenas eran apreciables. Se ha optado por emplear valores en los cuales se puedan apreciar diferencias.

Señal de entrada al canal:

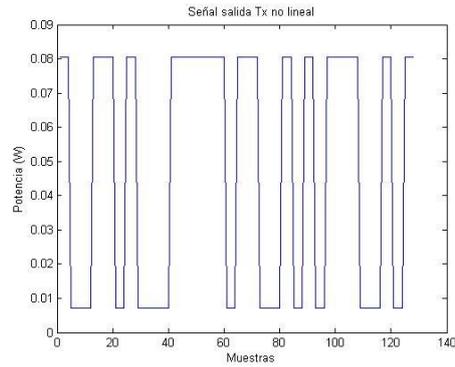


Figura 5.38. Señal entrada canal Optilux

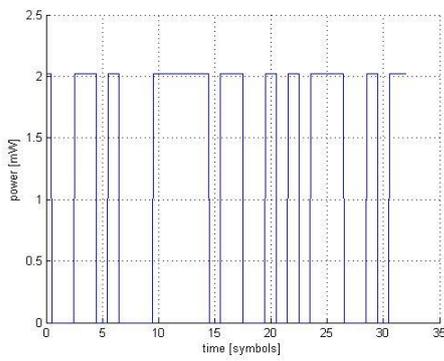


Figura 5.39. Señal salida. Coef. Disp = 0

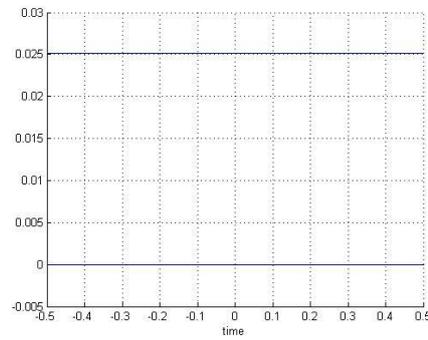


Figura 5.40. Diagrama de ojos. Coef. Disp. = 0

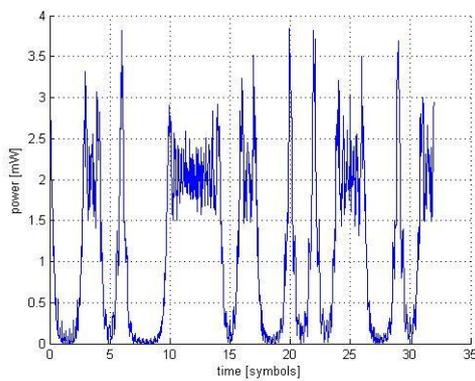


Figura 5.41. Señal salida. Coef. Disp = 5 ps/nm/Km

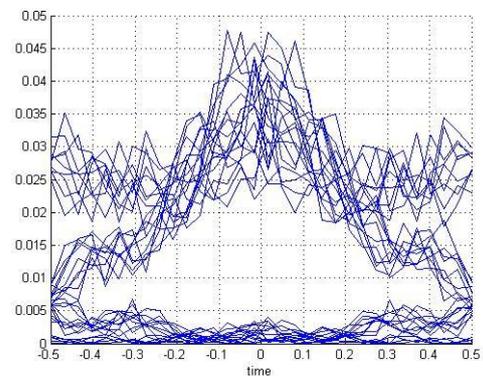


Figura 5.42. Diagrama de ojos.
Coef. Disp. = 5 ps/nm/Km

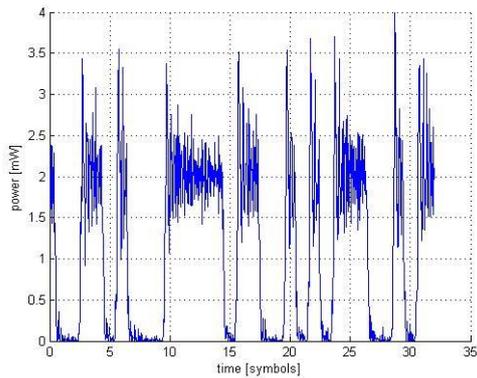


Figura 5.43. Señal salida Coef. Disp =10 ps/nm/Km

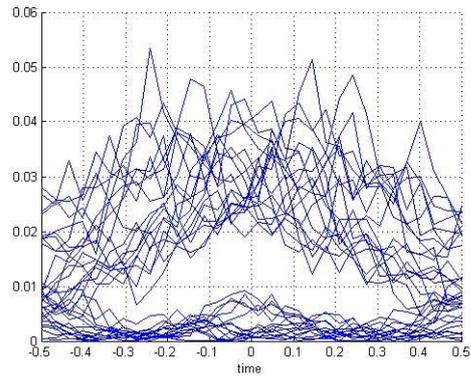


Figura 5.44. Diagrama de ojos.
Coef. Disp =10 ps/nm/Km

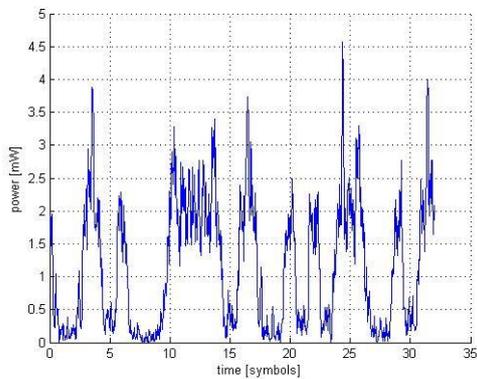


Figura 5.45. Señal salida Coef. Disp =15 ps/nm/Km

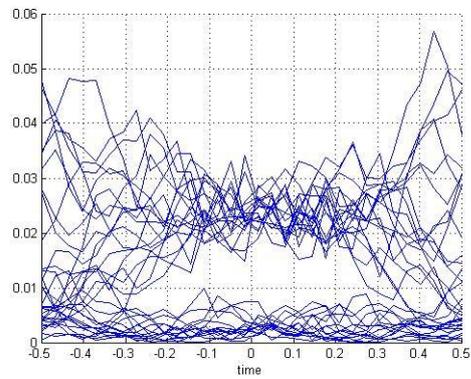


Figura 5.46. Diagrama de ojos.
Coef. Disp. =15 ps/nm/Km

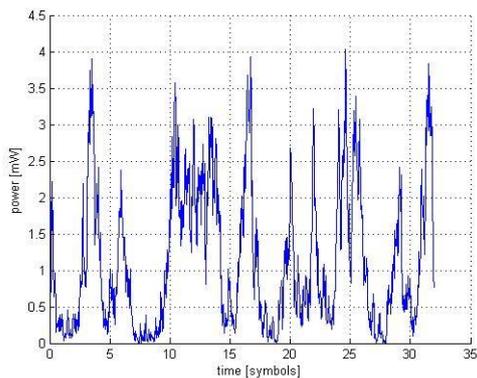


Figura 5.47. Señal Salida. Coef. Disp =20 ps/nm/Km

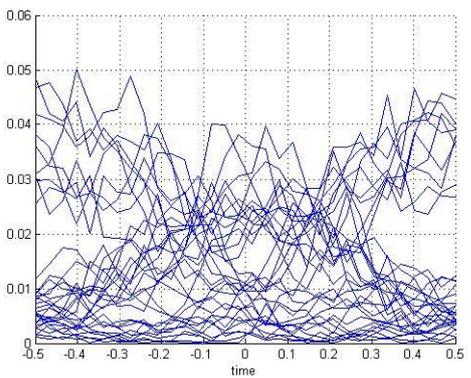


Figura 5.48. Diagrama de ojos.
Coef. Disp. =20 ps/nm/Km

Como podemos observar, conforme aumenta el coeficiente de dispersión de la fibra la señal sufre una mayor degradación, hasta tal punto de no poder distinguir si lo enviado a través de la fibra es un "1" o un "0".

Este hecho se aprecia en los diagramas de ojos asociados a cada coeficiente de dispersión. Cuando el coeficiente de dispersión se encuentra en 0 y 15 ps/nm/Km, la diferencia entre la amplitud asociada al "1" y al "0" todavía es lo suficientemente amplia como para poder establecer un punto en el que sea posible distinguir si lo enviado fue un "1" o un "0".

Sin embargo, cuando el coeficiente de dispersión alcanza los 20 ps/nm/km, el rango de amplitud es muy reducido y la probabilidad de cometer error a la hora de decidir si lo transmitido es un "1" o un "0" aumenta.

Otro aspecto a tener en cuenta es el régimen binario, puesto que para un mismo coeficiente de dispersión, cuanto mayor sea el régimen binario mayor será la dispersión cromática que sufrirá la señal. Este hecho se muestra a continuación.

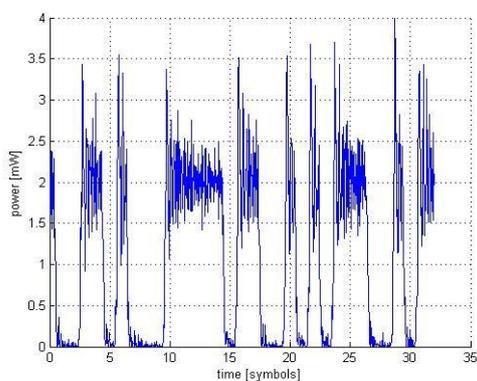


Figura 5.49. Señal salida.
Coef. Disp =10 ps/nm/Km, Rb=10 Gbps

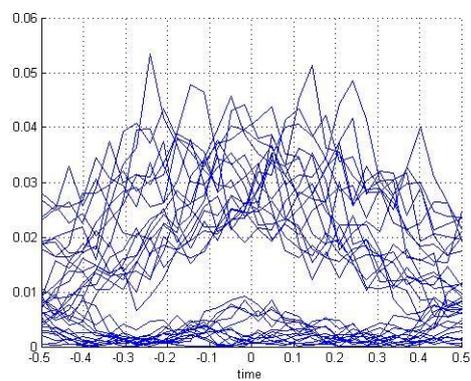


Figura 5.50. Diagrama de ojos,
Coef. Disp.=10 ps/nm/Km, Rb= 10 Gbps

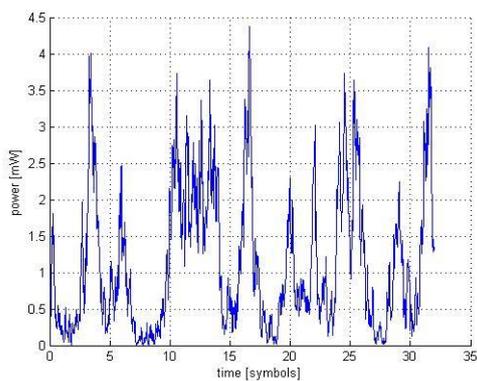


Figura 5.51. Señal salida. ,
Coef. Disp =10 ps/nm/Km, Rb=12 Gbps

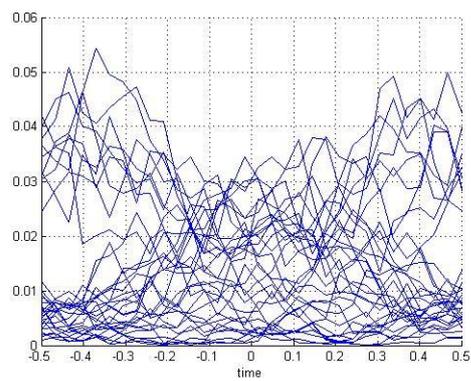


Figura 5.52. Diagrama de ojos,
Coef. Disp.=10 ps/nm/Km, Rb= 12 Gbps

Mediante la realización de estas pruebas se ha querido mostrar el modelo de canal desarrollado por Optilux y su funcionamiento, así como las diferentes prestaciones que aporta, destacando de las mismas la simulación de los efectos no lineales que sufre la señal al propagarse por la fibra.

5.4. EVALUACIÓN DE LOS RECEPTORES EMPLEADOS EN AUSENCIA DE RUIDO

Como se ha comentado previamente en los apartados teóricos, para la realización del presente proyecto se han valorado el empleo de dos posibles tipos de receptores: los basados en fotodiodos PIN y los compuestos por fotodiodos APD o de efecto de avalancha.

Se ha considerado como receptor el bloque que incluye el fotodiodo que realiza la conversión óptico-eléctrica, el filtro paso-bajo y el posterior decisor empleado para recuperar correctamente la señal enviada. A su vez, una vez obtenida la señal recuperada tras el decisor, se realiza un cálculo de la tasa de error de bit cometido.

Dicha tasa nos indica el porcentaje de error cometido en la decisión y recuperación de la señal recibida respecto la enviada, es decir, los bits que se identificaron en recepción como "1" y que en la señal enviada eran "0", y viceversa.

En todas las pruebas realizadas se ha empleado un filtro ideal.

En un principio se va a demostrar el funcionamiento de ambos receptores en ausencia de ruido.

5.4.1. Receptor PIN

El receptor PIN es uno de los receptores más sencillos que existe. El principal parámetro a tener en cuenta es la responsividad del mismo. Por ello, las pruebas realizadas se han centrado en observar y valorar el impacto al variar la responsividad del receptor.

La variación de la responsividad del receptor afectará en mayor o menor medida, dependiendo de la potencia de la señal de entrada al receptor, a la señal de salida del mismo y la que llegará al decisor.

Si la señal de entrada presenta unos valores bajos de potencia, nos interesara que nuestro receptor posea una alta responsividad con el fin de obtener a su salida una señal con la que el decisor pueda operar.

En función del tipo de material del que esté compuesto el fotodiodo, la responsividad se encuentra entre unos rangos determinados:

Material	Responsividad (A/W)
Si	0.4 - 0.6
Ge	0.5 - 0.7
InGaAs	0.6 - 0.9

Se ha empleado como señal de entrada la procedente a la salida del canal correspondiente al transmisor no lineal, la cual se muestra a continuación:

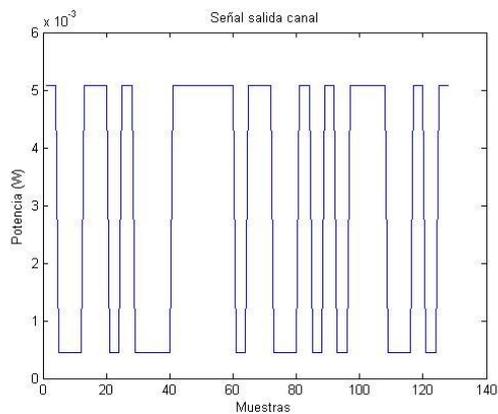


Figura 5.53. Señal entrada Receptor

Como se puede apreciar, la señal de entrada en el receptor es del orden de los mW, y en la tabla anterior observamos que tratándose de un receptor PIN, la responsividad podrá valer como máximo 0.9, por lo que la señal a la salida de receptor presentara una intensidad del orden de 10^{-4} A.

A continuación se muestran las señales obtenidas a la salida del receptor y del decisor para diferentes valores de la responsividad:

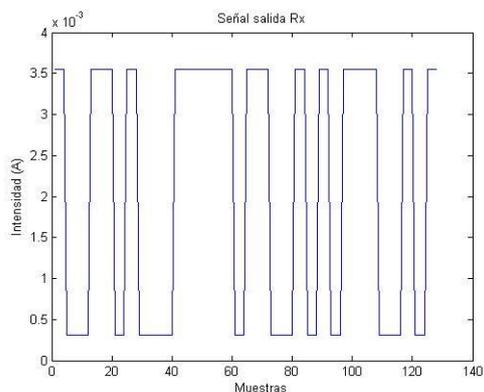


Figura 5.54. Salida Receptor PIN. $R= 0.7 \text{ A/W}$

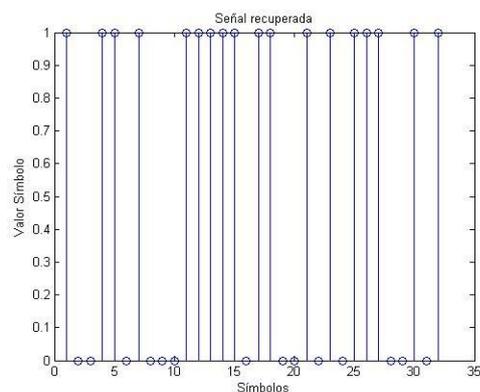


Figura 5.55. Señal salida decisor. Umbral: 0.0006 A

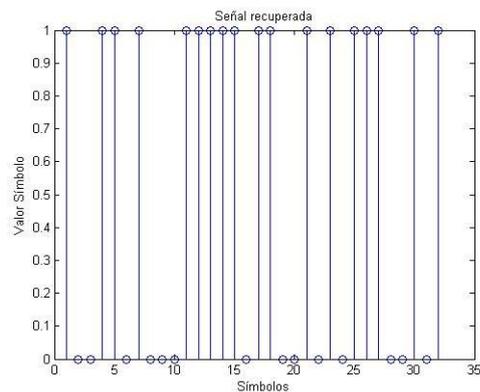
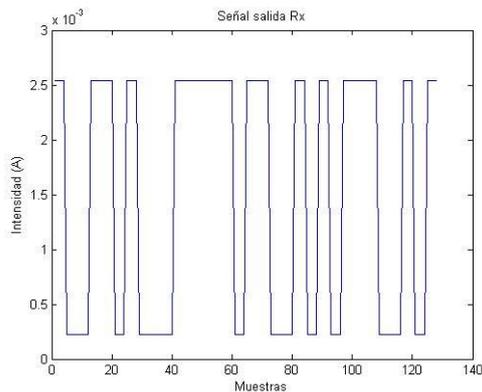


Figura 5.56. Salida Receptor PIN. $R= 0.7 \text{ A/W}$ Figura 5.57. Señal salida decisor. Umbral: 0.0004 A

Comparativa entre las señales de salida obtenidas para las responsividades anteriores:

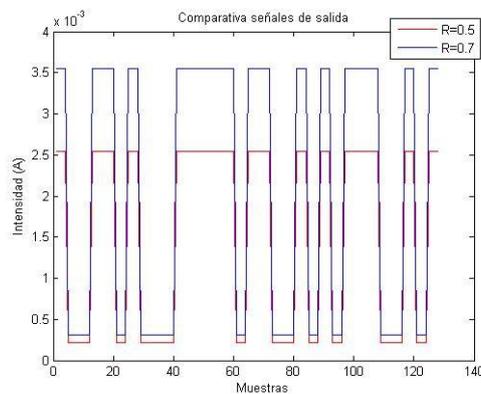


Figura 5.58. Comparativa $R=0.7$ y $R=0.5$

A raíz de las pruebas realizadas, podemos observar que la amplitud (intensidad) de la señal de salida del receptor se va reduciendo conforme la responsividad disminuye, por lo que la señal de entrada al decisor presentará valores de intensidad bajos y será necesario ajustar el umbral lo máximo posible.

En este caso, la señal recuperada coincide con la enviada, puesto que en ausencia de ruido y con el umbral adecuado es posible obtener una tasa de error de bit igual a cero.

5.4.2. Receptor APD

En este caso los parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar las pruebas serán tanto la responsividad como el factor de multiplicación del receptor (M). Este último parámetro, el factor de multiplicación, es la característica diferenciadora con respecto al anterior tipo de receptor (PIN).

Al aplicar el factor de multiplicación o ganancia, los receptores APD son capaces de obtener buenas señales de salida a partir de señales de entrada de muy baja potencia. Es por ello que para señales de baja potencia obtendrán mejores resultados de salida que los proporcionados por los receptores PIN.

A igual que sucedía con los receptores tipo PIN, en función del material del que esté compuesto los valores de la responsividad y del factor de multiplicación pueden tomar los siguientes valores:

Material	M x Responsividad (A/W)
Si	80-130
Ge	3-30
InGaAs	5-20

Para la realización de las pruebas se ha empleado la misma señal de entrada al receptor que en el caso anterior.

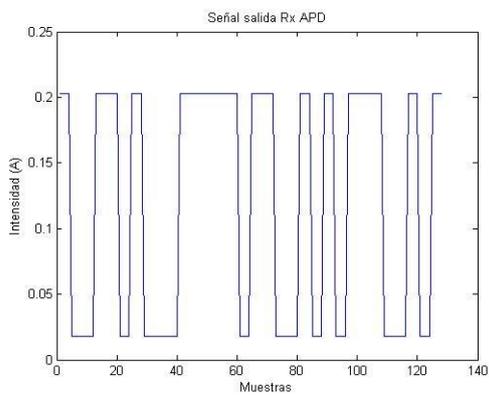


Figura 5.59. Salida Receptor APD. RxM= 50 A/W

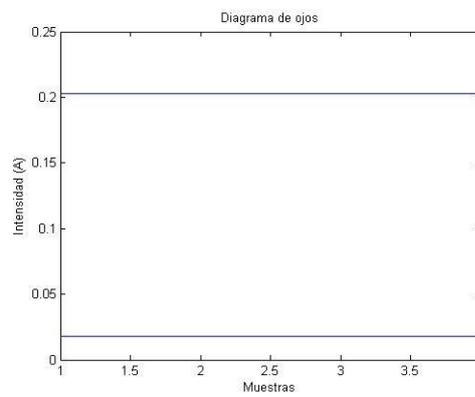


Figura 5.60. Diagrama de ojos.
Rx APD RxM= 50 A/W

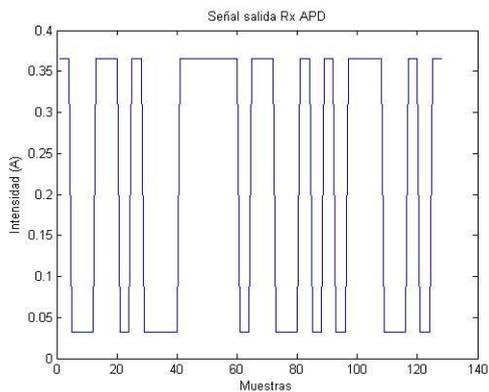


Figura 5.61. Salida Receptor APD. RxM= 90 A/W

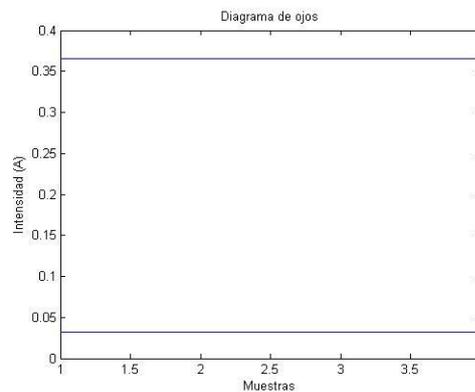


Figura 5.62. Diagrama de ojos.
Rx APD RxM= 90 A/W

Como se puede observar en las imágenes, la señal a la salida del receptor APD presenta unos valores de intensidad muy superiores a los que presentaba la señal de salida del receptor PIN.

Como se ha comentado previamente, esta ventaja es uno de los factores que más influyen a la hora de seleccionar los receptores APD para sistemas en los que las señales que llegan al receptor, bien debido a su naturaleza o bien por haber sufrido una grana atenuación, son de muy baja potencia.

Tal y como se puede observar en el diagrama de ojos, la diferencia entre amplitudes es bastante considerable, de modo que el margen para situar el umbral del decisor será más amplio que en el caso de los receptores PIN.

Análisis comparativo entre receptor PIN y APD

La principal diferencia entre ambos receptores la encontramos en la función que emplean para obtener la intensidad de corriente de salida a partir de la potencia óptica de entrada.

En el caso de los receptores PIN la intensidad de corriente se obtiene multiplicando la potencia óptica de entrada por la responsividad del fotodiodo, mientras que en los receptores APD se introduce un factor de ganancia o multiplicación, que se aplica sobre el producto de la responsividad y la potencia óptica de entrada.

Los receptores PIN no aplican ganancia teniendo en cuenta que la responsividad podrá presentar un valor máximo de 1 (suponiendo caso ideal), mientras que el receptor APD en todos los casos aporta una determinada ganancia, por lo que la señal a su salida presentará una diferencia entre las amplitudes asociadas a cada símbolo mayor que la que observaríamos a la salida de un receptor PIN.

Este hecho lo podemos apreciar en los diagramas de ojos correspondientes a las señales de salida de ambos receptores, mostradas a continuación:

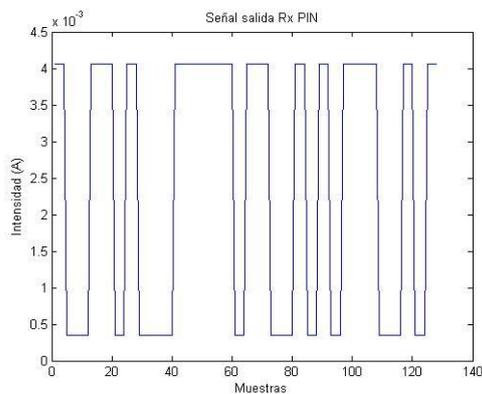


Figura 5.63. Salida Receptor PIN. $R = 0.8 \text{ A/W}$

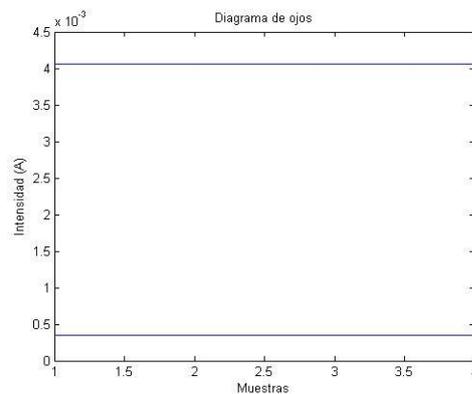


Figura 5.64. Diagrama de ojos.
Rx PIN $R = 0.8 \text{ A/W}$

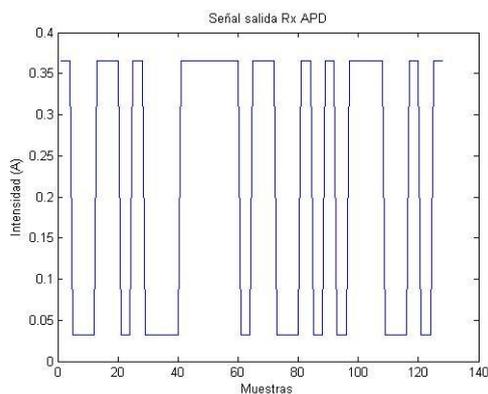


Figura 5.65. Salida Receptor APD. $RxM = 50 \text{ A/W}$

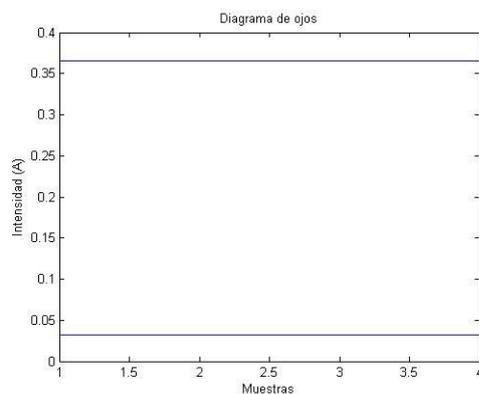


Figura 5.66. Diagrama de ojos.

Rx APD RxM= 50 A/W

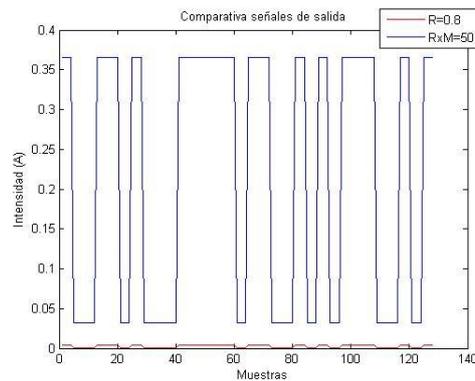


Figura 5.67. Comparativa salida: Rx PIN vs Rx APD

En las gráficas se puede observar lo comentado anteriormente. Cabe destacar la diferencia, en este caso para una misma señal de entrada, entre las intensidades de ambas señales de salida.

5.5. EVALUACIÓN DE LOS RECEPTORES EMPLEADOS EN PRESENCIA DE RUIDO ADITIVO

Hasta ahora hemos realizado las pruebas sin tener en cuenta la presencia alguna de ruido. El objetivo de estas últimas pruebas reside en comprobar el impacto del ruido sobre la señal transmitida y sobre el correcto funcionamiento del propio sistema.

Es en este punto donde se diferencia nuestro software desarrollado en Matlab del código implementado en Optilux, debido a que Optilux no permite ni tiene en cuenta en sus simulaciones los efectos del ruido.

A la hora de simular el ruido hay que considerar diversos aspectos, como por ejemplo asumir que afecta durante la transmisión de la señal a lo largo de todo el sistema, pero se añade al final del mismo en la etapa del receptor.

Como se ha comentado anteriormente, el ruido considerado es de tipo aditivo y coloreado, puesto que no afecta a todo el ancho de banda.

Una vez introducido el parámetro del ruido cobra sentido realizar el cálculo de la relación señal a ruido (SNR) de nuestro sistema. El valor de la SNR nos servirá como referencia a la hora de realizar las comparaciones entre el ruido en el receptor PIN y el receptor APD.

Para realizar el cálculo del ruido se ha empleado la potencia asociada a la transmisión de un "1", ya que es en ese caso cuando mayor potencia se estará transmitiendo y, por lo tanto, cuando el ruido será mayor.

El ruido aditivo total es la suma de los tres ruidos que nos podemos encontrar en el bloque receptor:

- Ruido térmico
- Ruido de oscuridad
- Ruido shot

En función del tipo del receptor se deberá realizar su cálculo de diferente manera.

5.5.1. Análisis comparativo entre receptor PIN y APD en presencia de ruido

En la anterior sección se ha realizado un estudio independiente tanto para el receptor PIN como para el APD. Sin embargo, se ha creído conveniente que para esta sección el estudio se realizase de forma conjunta, dado que de esta forma seremos capaces de apreciar mejor las diferencias.

A la hora de calcular el ruido tenemos que diferenciar el tipo de receptor que estamos empleando en nuestro sistema, debido a que en función del que se trate, el ruido y la relación señal a ruido variarán.

El factor de multiplicación y el factor de exceso de ruido sólo aplican cuando se trate de un receptor APD. Por ello, la contrapartida de la ganancia que aplica el receptor APD a la señal la encontramos en que también amplifica el ruido a la entrada del mismo.

Para el cálculo de los diferentes ruidos en las pruebas que siguen a continuación se ha tomado un valor de corriente de oscuridad de 1nA, una temperatura ambiente de 293 K° y una resistencia interna de 500 Ω .

En el cálculo de la relación señal a ruido se ha fijado un ancho de banda de 150 MHz.

Cabe destacar que la modificación de cualquiera de los parámetros comentados anteriormente modificaría tanto el valor del ruido total como el de la SNR. Por ejemplo, reducir el ancho de banda disminuiría el nivel de ruido, pero si lo reducimos demasiado podríamos no estar cogiendo toda la señal.

Transmisor no lineal

Para la realización de la prueba se evaluará un sistema completo compuesto por un transmisor no lineal, el canal de transmisión y ambos receptores.

El transmisor no lineal presenta los siguientes parámetros:

- I_{th} = 20 mA
- I_b = 35 mA
- I_{sat} = 100 mA

La señal de entrada presentará una intensidad de pico de 10 mA, y una vez pasado el módulo transmisor presentará el siguiente aspecto:

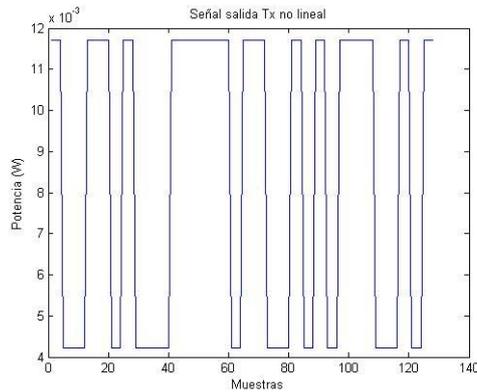


Figura 5.68. Salida Tx

La señal de salida del transmisor se propagará a través de un canal de 100 km de longitud y una atenuación de 0.4 dB/Km. La señal resultante a la salida del canal y la que tomaremos como entrada del receptor será la que se muestra a continuación:

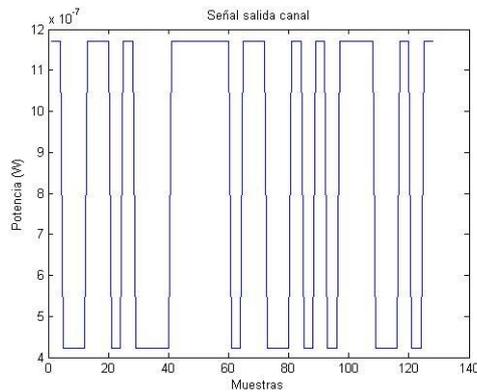


Figura 5.69. Salida Canal. $\alpha = 0.4$ dB/Km. $D = 100$ Km

Los resultados obtenidos para ambos transmisores son:

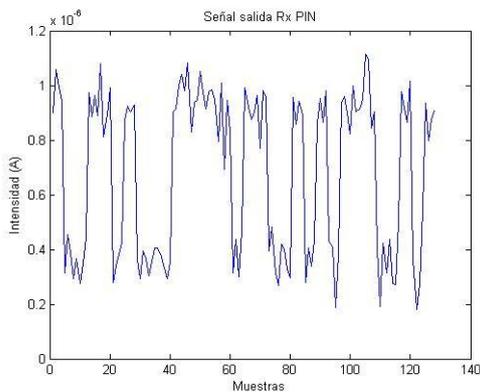


Figura 5.70. Salida Rx PIN. $R=0.8$ A/W

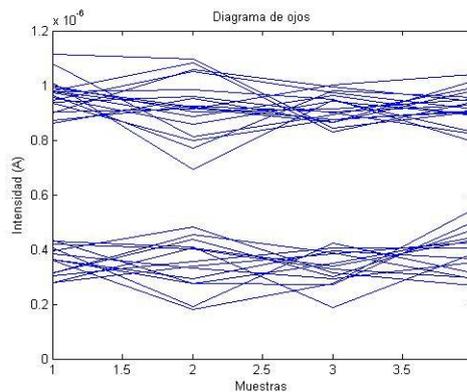


Figura 5.71. Diagrama de ojos Rx PIN

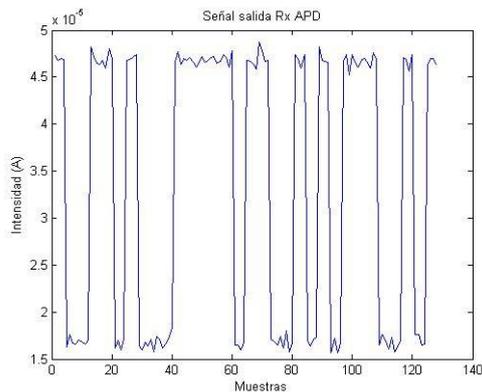


Figura 5.72. Salida Rx APD $M \times R=50$ A/W

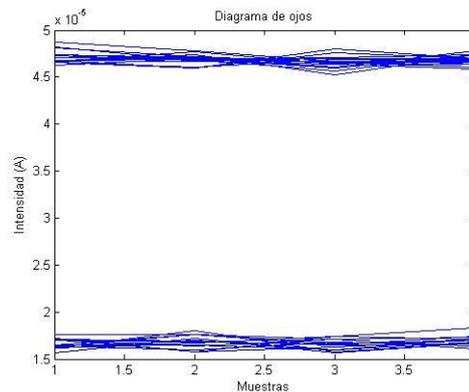


Figura 5.73. Diagrama de ojos Rx APD

Como podemos observar, la señal de salida del receptor PIN presenta unos valores de intensidad más bajos que los ofrecidos por el receptor APD. En la señal de salida del receptor apreciamos el efecto del ruido en los valores máximo y mínimo de la señal, a diferencia del caso en el que no se consideraba ruido alguno en el que siempre tomaban el mismo valor, mientras que ahora se producen pequeñas oscilaciones en torno al valor ideal.

Este hecho se puede apreciar en la apertura del diagrama de ojos. Ya no existe una única línea, sino que se superponen los diferentes valores que puede tomar un mismo símbolo.

En cuanto a términos cuantitativos, en el caso del receptor PIN se han obtenido los siguientes valores:

- Ruido térmico: $4.851 \cdot 10^{-15}$ A
- Ruido Shot: $4.8 \cdot 10^{-20}$ A
- Ruido de oscuridad: $4.5 \cdot 10^{-17}$ A
- Ruido total: $4.897 \cdot 10^{-15}$ A
- Intensidad media de la señal de salida: $6.796 \cdot 10^{-7}$ A
- SNR: 22.54 dB

Para el receptor APD esos mismos valores han sido:

- Ruido térmico: $4.851 \cdot 10^{-15}$ A
- Ruido Shot: $4.4216 \cdot 10^{-14}$ A
- Ruido de oscuridad: $4.5 \cdot 10^{-17}$ A
- Ruido total: $4.9068 \cdot 10^{-14}$ A
- Intensidad media de la señal de salida: $3.375 \cdot 10^{-5}$ A
- SNR: 38.55 dB

De los resultados cuantitativos podemos observar como de los tres posibles ruidos, es el denominado ruido shot al que le afecta el factor de ganancia del receptor APD. Por ello, el receptor APD amplifica también el ruido de entrada y ofrece a su salida una intensidad de ruido total mayor que la que ofrece el receptor PIN.

En el caso del receptor APD también es necesario el factor de exceso de ruido “x” asociado a cada material.

En cuanto a la relación señal a ruido, observamos que la del receptor PIN es notablemente menor que la del receptor APD, pese a que su señal de salida se ve afectada por una intensidad de ruido menor. Esto es debido a que la señal de salida del receptor PIN presenta una intensidad media de dos órdenes de magnitud menor.

En ambos casos la tasa de error de bit ha sido nula, puesto que a pesar de la presencia de ruido todavía queda margen para establecer un umbral efectivo.

En la siguiente prueba se ha procedido a modificar la constante de atenuación de la fibra y la responsividad del receptor PIN y el factor de ganancia del receptor APD, con el fin de incrementar la degradación de la señal lo máximo posible y observar así un mayor impacto del ruido.

Receptor PIN

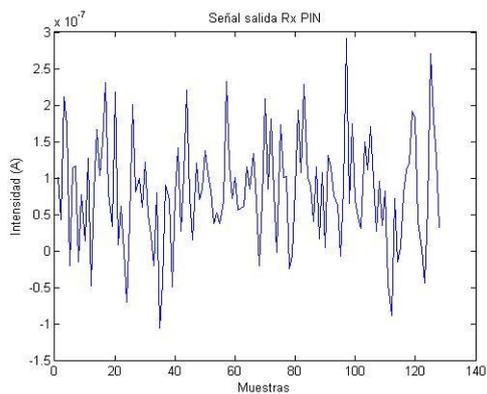


Figura 5.74. Salida PIN. $R=0.9 A/W$

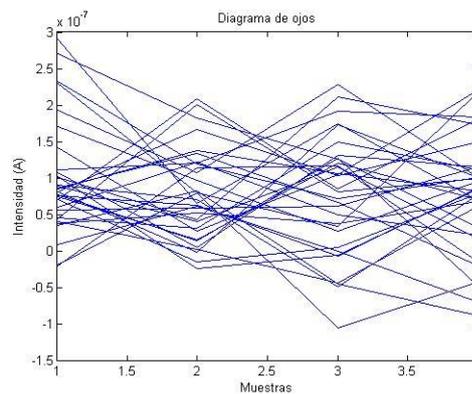


Figura 5.75. Diagrama de ojo PIN. $R = 0.9 A/W$

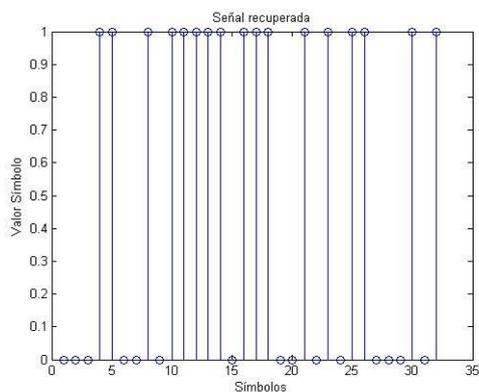


Figura 5.76. Señal recuperada. Rx PIN $R=0.9 A/W$

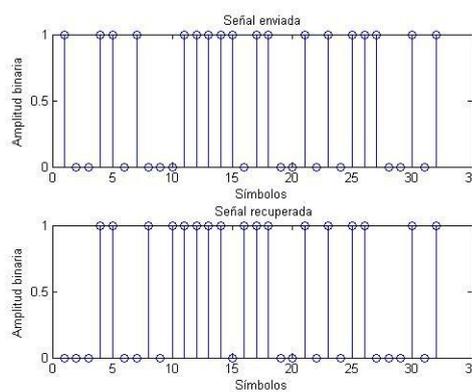


Figura 5.77. Señal enviada vs señal recuperada.
Rx PIN $R=0.9 A/W$

Como se ha comentado anteriormente, se ha procedido a degradar lo máximo posible la señal para que el impacto del ruido sobre ésta fuese el mayor posible. En la imagen correspondiente a la señal de salida del transmisor se puede apreciar que la señal ha perdido prácticamente su forma original, y sólo se observan picos desiguales en los máximos y en los mínimos.

En el diagrama de ojos se refleja dicho efecto y ya no se observa su apertura característica, debido a que ya no existe una diferenciación clara entre los valores asignados al "1" y al "0".

Por ello, no se podrá establecer un umbral de decisión óptimo, sino que se seleccionará aquel valor que presente una mayor "apertura" en el diagrama de ojos. En este caso no se ha conseguido recuperar una señal idéntica a la enviada dado que el decisor ha fallado al asignar el valor correspondiente debido a la presencia de ruido.

Los valores obtenidos en este caso han sido:

- SNR: 0.9931 dB
- BER: 0.2188

El valor BER teórico obtenido ha sido de 0,2422. Como se puede apreciar, es un valor muy similar al obtenido de forma experimental.

Se concluye por lo tanto, que el valor de la SNR obtenido para este sistema es insuficiente.

Receptor APD

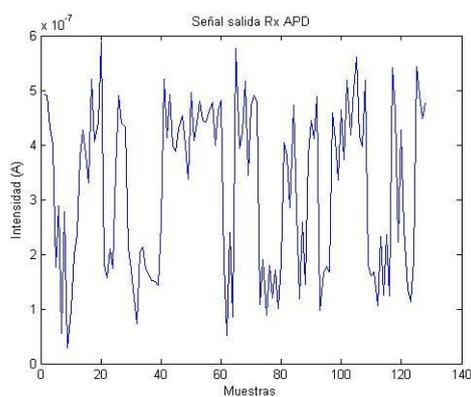


Figura 5.78. Salida APD. $M \times R=5$ A/W

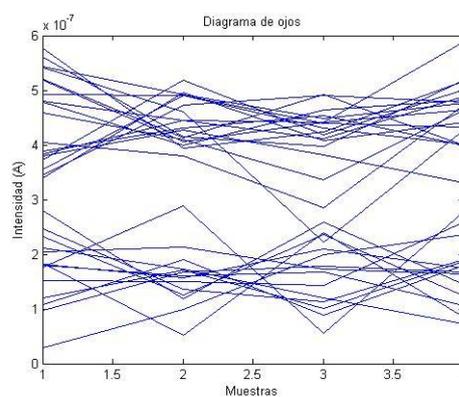


Figura 5.79. Diagrama de ojo APD. $M \times R = 5$ A/W

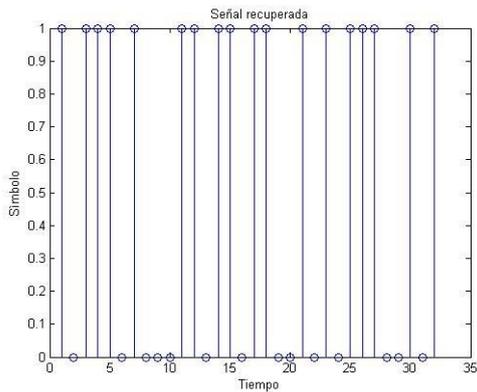


Figura 5. 80. Señal recuperada.

APD. $M \times R=5 A/W$

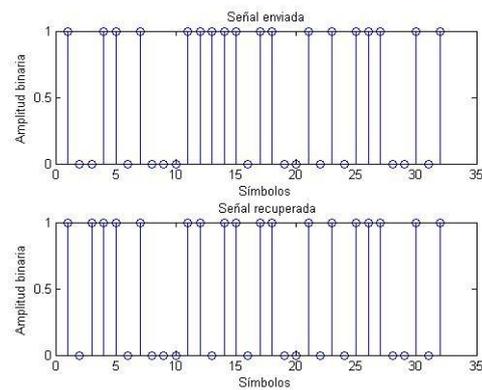


Figura 5.81. Señal enviada vs señal recuperada.

APD. $M \times R=5 A/W$

Como se puede observar, en este caso también se ha degradado lo máximo posible la señal. La señal de salida del receptor todavía mantiene levemente su forma original y en el diagrama de ojos se puede apreciar una cierta apertura pese al ruido. Por ello se podrá establecer un umbral que, pese a no ser el óptimo, ofrecerá una tasa de error de bit pequeña.

Los valores obtenidos para esta simulación han sido:

- SNR: 1.9948 dB
- BER: 0.0625

La BER teórica obtenida para este caso ha sido de 0.2647. Como se puede apreciar, la BER teórica es superior a la BER obtenida en la práctica. La BER teórica sirve como un indicador del comportamiento esperado del sistema en cuanto a la tasa de fallos se refiere. Sin embargo, el resultado obtenido en una simulación puede diferir del valor teórico esperado.

En este caso, pese a presentar un valor de SNR muy bajo, es suficiente para poder recuperar prácticamente la señal original. Se ha empleado un régimen binario bajo para poder observar la influencia de cada parámetro.

6. EVALUACIÓN DEL SISTEMA ROF IMPLEMENTADO EN MATLAB

La principal característica de los sistemas de radio sobre fibra reside en la necesidad de modular la señal para trasladarla a altas frecuencias. Es por ello que las siguientes pruebas van destinadas a evaluar la modulación y demodulación de la señal transmitida, así como los diferentes módulos que en ella intervienen.

6.1. EVALUACIÓN DE LA MODULACIÓN

El esquema general del sistema de comunicaciones desarrollado es el mismo que el del sistema digital de radio sobre fibra, exceptuando que la señal a transmitir por el mismo deberá trasladarse a una frecuencia elevada, por lo que será necesario modularla.

Para realizar la modulación se ha introducido un módulo nuevo antes del transmisor denominado modulador, el cual recibe como parámetro de entrada la señal a modular mediante una señal portadora.

El transmisor utilizado para la realización de las pruebas ha sido el transmisor no lineal.

Para la realización de la prueba se empleará como señal portadora un coseno de amplitud unidad y del cual se podrá variar su frecuencia.

La frecuencia de la portadora se escogerá en función de la señal a modular. A continuación se muestra un ejemplo de señales portadoras:

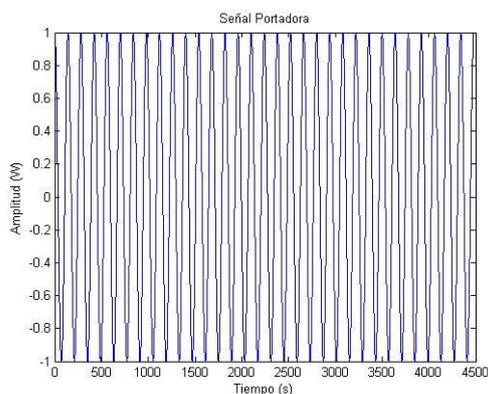


Figura 6.1. Portadora. $F_c = 100$ KHz

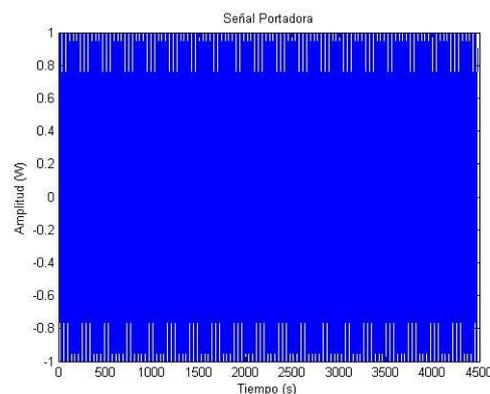


Figura 6.2. Portadora. $F_c = 10$ MHz

Como se puede apreciar, cuanto mayor es la frecuencia de la portadora menor es el periodo de la misma.

En el caso de la modulación los principales parámetros a tener en cuentas son: el régimen binario de la señal a transmitir y la frecuencia de la portadora.

La frecuencia de muestreo no es un parámetro que dependa de nuestro sistema. Sin embargo, en el software desarrollado en Matlab se deberá incrementar el valor de la misma ya que se

necesitará muestrear una portadora cuya frecuencia será mayor que la de la señal en banda base.

Para la realización de esta prueba se ha transmitido una señal de 1 Mbps, empleando una portadora de 10 MHz, a través de un enlace de fibra de 40 km con una constante de atenuación de 0.4 dB/Km.

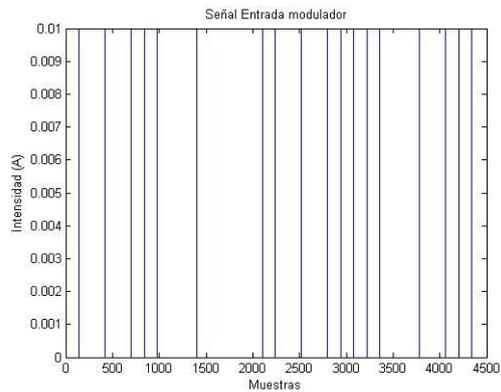


Figura 6.3. Señal de entrada. $P_{peak} = 10$ mA.

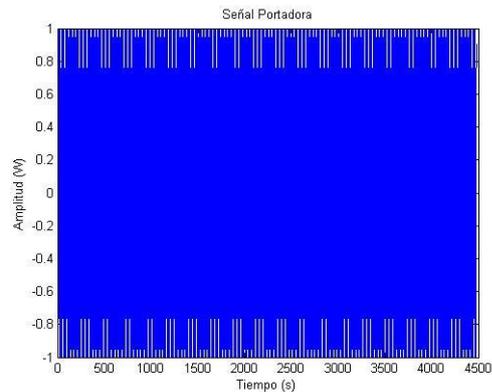


Figura 6.4. Portadora. $F_c = 10$ MHz

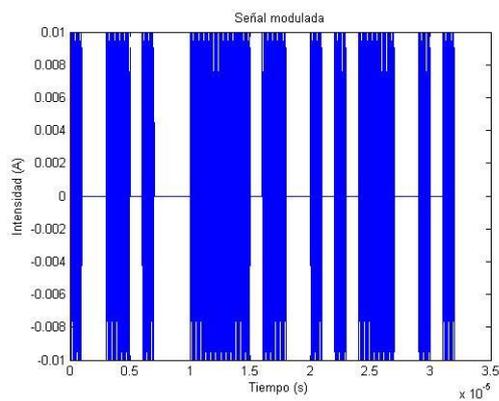


Figura 6.5. Señal modulada Dominio temporal.

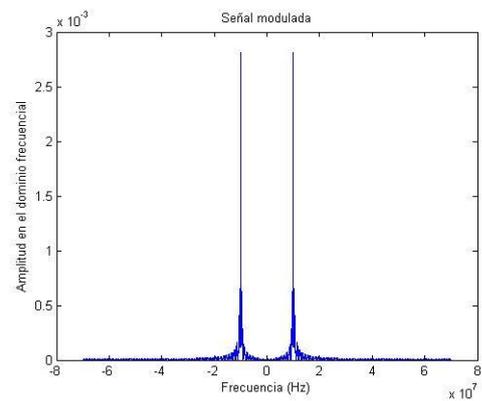


Figura 6.6. Señal modulada. Dominio frecuencial

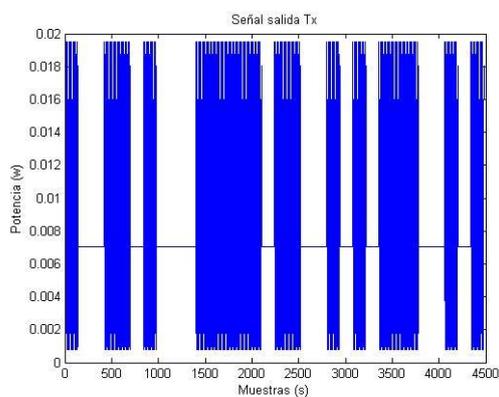


Figura 6.7. Salida Tx. $I_{th} = 20$ mA. $I_b = 35$ mA

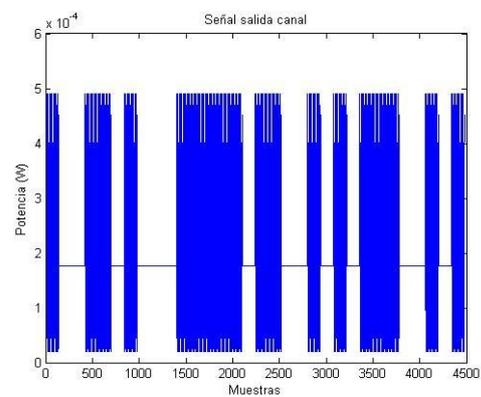


Figura 6.8. Salida Canal. $D = 40$ Km. $\alpha = 0.4$ dB/Km

En la secuencia de imágenes podemos observar el proceso de modulación y transmisión de una señal digital. Del anterior proceso cabe destacar las figuras relativas a la señal modulada en el dominio temporal y la señal modulada en el dominio frecuencial, siendo en ésta dónde se puede apreciar que la modulación se ha realizado correctamente, puesto que la señal ha sido trasladada a la frecuencia de la portadora, en este caso a 10 MHz.

Una vez la señal ha sido modulada, el proceso de transmisión es el mismo que en el caso del sistema digital sobre fibra, es decir, la señal modulada sale del bloque del transmisor y es propagada a través de la fibra óptica.

A continuación mostraremos la modulación de la misma señal empleando una portadora de 1 GHz; en la sección dedicada a la transmisión de varios canales (WDM) emplearemos portadoras de esas magnitudes.

Para poder obtener una señal de salida fiable ha sido necesario incrementar la frecuencia de muestreo.

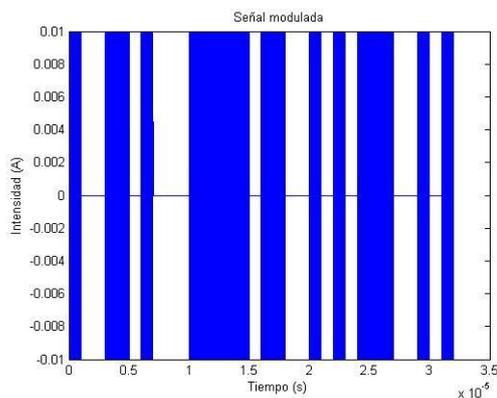


Figura 6.9. Señal modulada Dominio temporal.

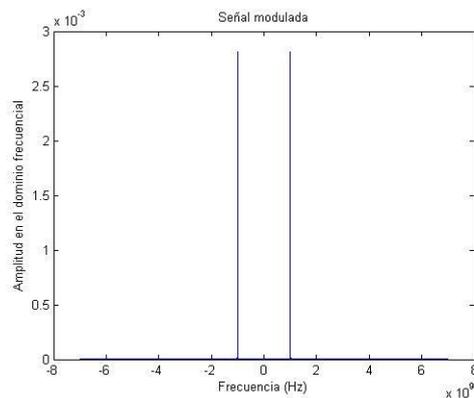


Figura 6.10. Señal modulada. Dominio frecuencial

Como se puede apreciar, la señal a transmitir ha sido trasladada a la frecuencia de 1 GHz, que es la frecuencia de la portadora empleada.

6.2. EVALUACIÓN DE LA DEMODULACIÓN EN AUSENCIA DE RUIDO

El proceso de demodulación es el inverso al proceso de modulación y se realiza en tres partes:

- Multiplicar la señal recibida por la portadora.
- Filtrar paso-bajo la señal resultante para obtener la señal en continua (centrada en el origen).
- Decidir si los símbolos recibidos son “1” o “0”.

Para realizar los procesos mencionados anteriormente se ha implementado un filtro paso-bajo, un bloque demodulador y un bloque decisor.

Los parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar la demodulación son principalmente la anchura del filtro paso bajo y el umbral del decisor. La anchura del filtro paso-bajo será determinante debido a que en función de lo que ajustemos el filtro al ancho de la señal se producirá una mayor o menor interferencia entre símbolos (IES).

A continuación se muestra el proceso de demodulación de la señal transmitida anteriormente:

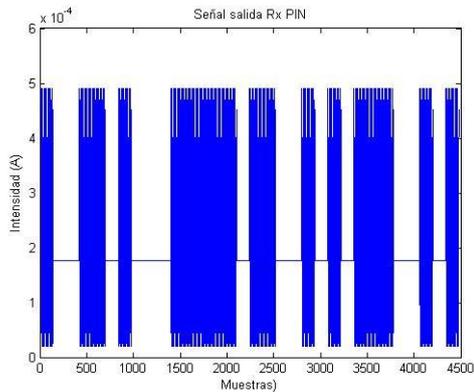


Figura 6.11. Salida Rx PIN

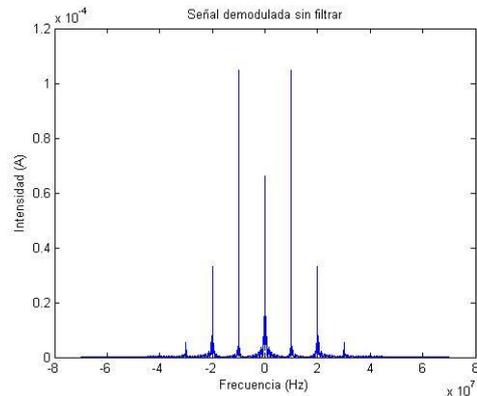


Figura 6.12. Señal demodulada sin filtrar paso-bajo

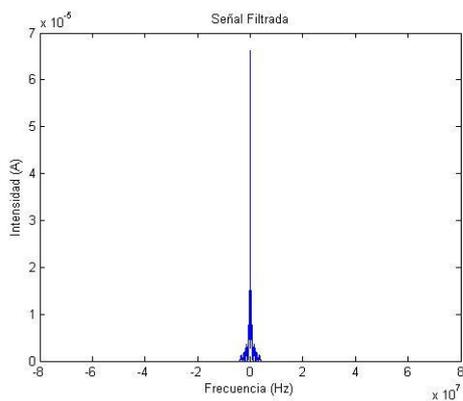


Figura 6.13. Señal filtrada paso-bajo.
Dominio frecuencial

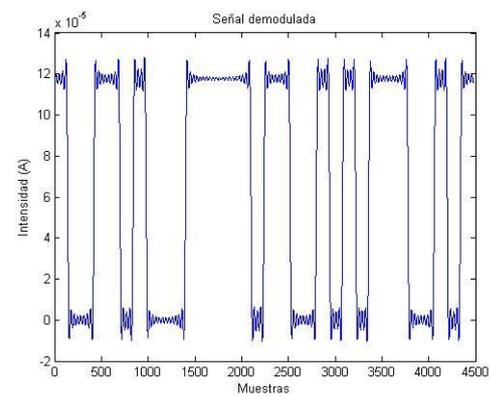


Figura 6.14. Señal filtrada paso-bajo.
Dominio temporal

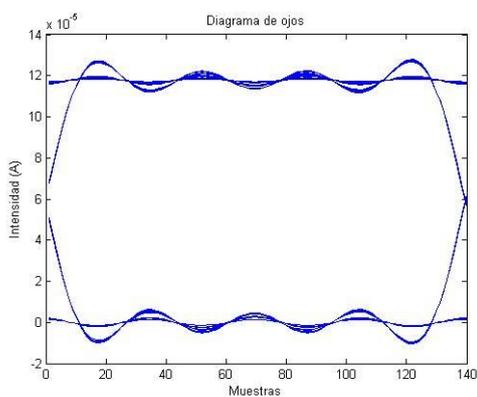


Figura 6.15. Diagrama de ojos señal filtrada.

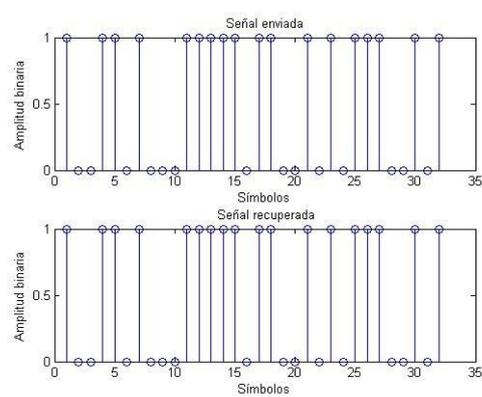


Figura 6.16. Señal filtrada paso-bajo.

Como se puede apreciar en la secuencia de imágenes, al realizar el filtrado paso-bajo en frecuencia de la señal recibida, conseguimos eliminar las componentes de señal en frecuencias no deseadas, y nos quedamos únicamente con la parte de la señal centrada en torno a la frecuencia cero.

Al realizar la conversión al dominio temporal de la señal filtrada obtenemos la señal que pasaremos al decisor y se procederá a compararla con la señal enviada. En este caso, dada la ausencia de ruido, se ha conseguido una tasa de error de bit igual a cero.

Tanto en la señal filtrada en el dominio temporal como en el diagrama de ojos de dicha señal, se puede apreciar los efectos de la modulación en las ondulaciones en torno a los máximos y mínimos.

Como se ha comentado, el ancho de banda del filtro paso-bajo es de vital importancia a la hora de recuperar la señal, ya que es muy importante que filtremos únicamente la señal centrada en el origen y que evitemos, en la medida de lo posible, poder coger señales en frecuencias cercanas. Se ha desarrollado una prueba para mostrar el efecto del ancho de banda del filtro en la señal demodulada.

Partiendo de la señal demodulada sin filtrar obtenemos:

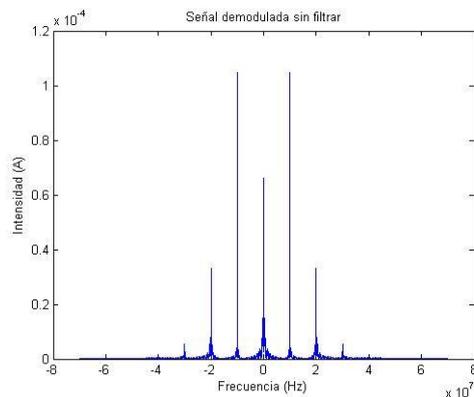


Figura 6.17. Señal demodulada sin filtrar inicial

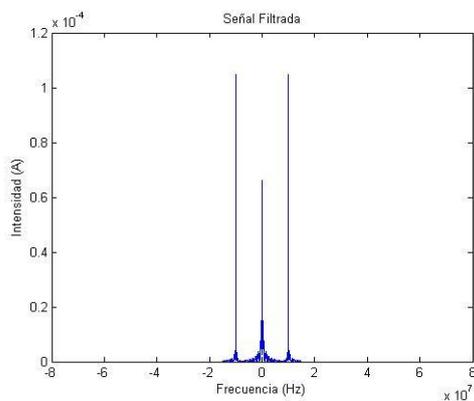


Figura 6.18. Señal demodulada filtro Paso-bajo ancho- Dominio frecuencial

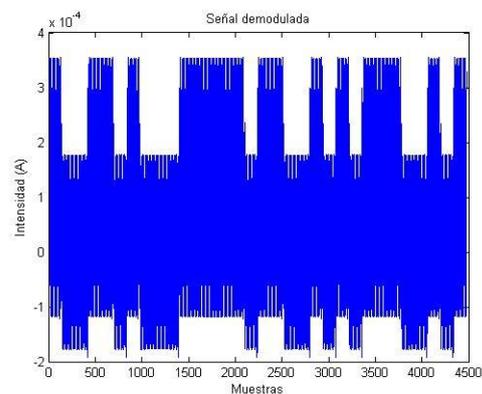


Figura 6.19. Señal demodulada filtro paso-bajo ancho

En la secuencia representada se ha empleado un filtro paso-bajo de una anchura mayor que el anterior. Es por ello que al realizar el filtrado de la señal recibida, aparte de coger la componente de la señal centrada en cero, estamos cogiendo también las componentes de las frecuencias contiguas.

Al representarla en el dominio temporal observamos las dos componentes. Por un lado se aprecia la señal original y, superpuesta, se aprecia la portadora. En este caso no es posible recuperar la señal original.

6.3. EVALUACIÓN DE LA DEMODULACIÓN CON RUIDO ADITIVO

Al igual que sucedía en el sistema digital sobre fibra óptica, el ruido aditivo se añade en la etapa de recepción, por lo que sólo se analizará la demodulación de la señal en presencia de ruido puesto que el resto del sistema (transmisor y canal) permanecen inalterados.

El aumento de ruido en un sistema se puede deber a diversas causas, en nuestro caso hemos tenido en cuenta la variación del factor de ruido o el factor de multiplicación, la variación de la anchura de banda en recepción y la variación de la distancia del enlace. Aumentar la distancia del enlace no aumenta en nivel de ruido pero sí disminuye la potencia de la señal por lo que es posible apreciar mejor la influencia del ruido sobre la misma.

Para realizar las pruebas procederemos a comparar las diferentes señales obtenidas en los casos propuestos con la siguiente señal afectada levemente por el ruido:

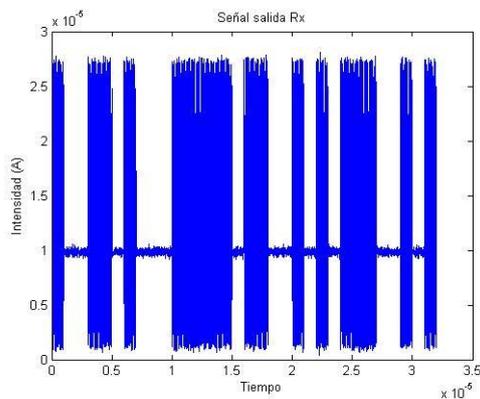


Figura 6.20. Salida rx señal modelo

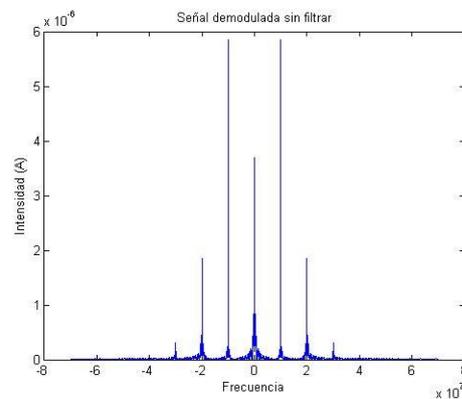


Figura 6.21. Señal modelo demodulada sin filtrar

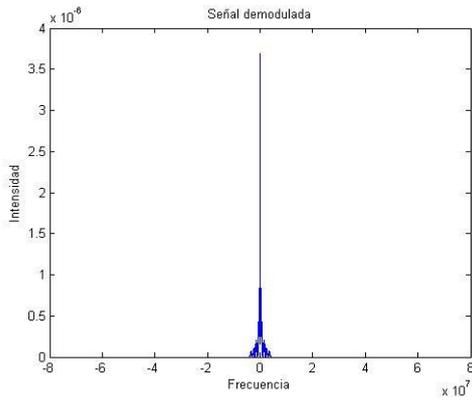


Figura 6.22. Señal modelo demodulada filtrada.
Dominio frecuencial

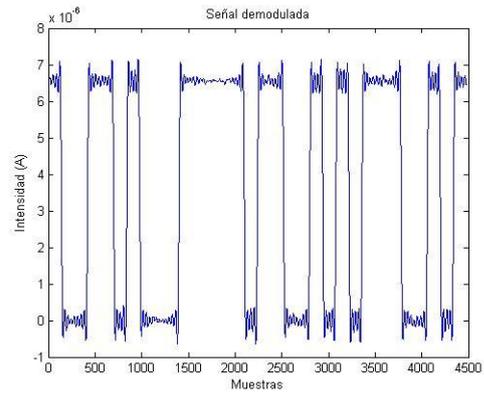


Figura 6.23. Señal modelo demodulada filtrada.
Dominio temporal

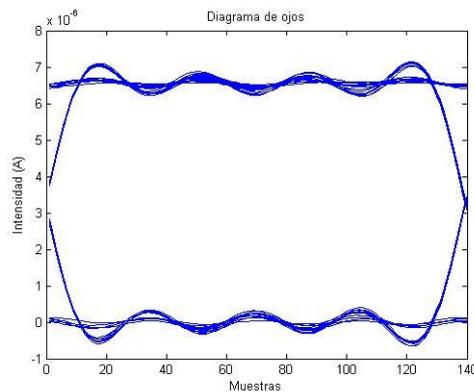


Figura 6.24. Diagrama de ojos. Señal modelo

La señal anterior se ve afectada por un ruido total de 4.999×10^{-14} A y presenta una SNR de 38.6503 dB.

Se ha obtenido una tasa de error de bit nula.

Disminución de la potencia de la señal al aumentar la distancia del enlace:

Para obtener la siguiente secuencia de imágenes se ha procedido a aumentar la longitud del enlace de fibra óptica manteniendo el resto de parámetros constantes.

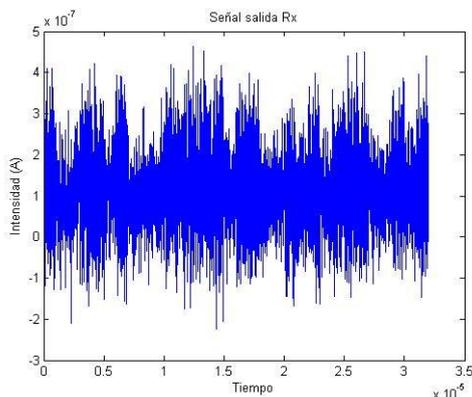


Figura 6.25. Salida rx aumentando distancia

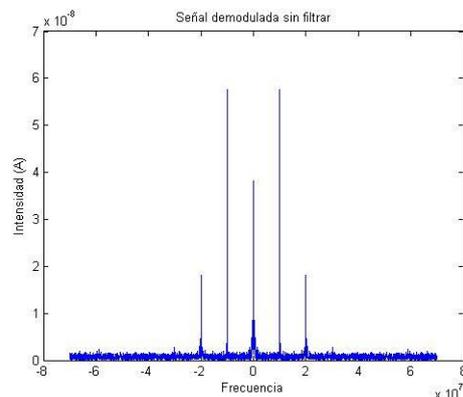


Figura 6.26. Demodulada sin filtrar. Aumenta D

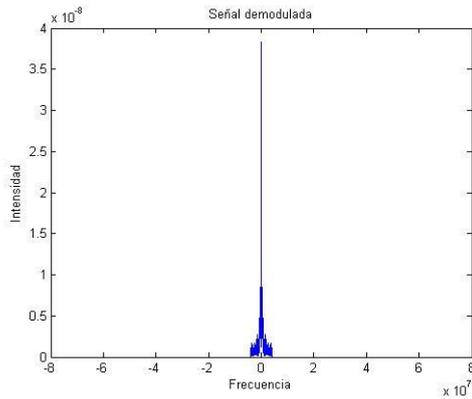


Figura 6.27. Demodulada filtrada. Aumenta D. Dominio frecuencial.

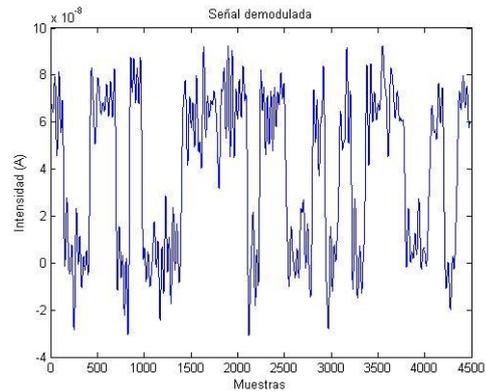


Figura 6.28. Demodulada filtrada. Aumenta D. Dominio temporal

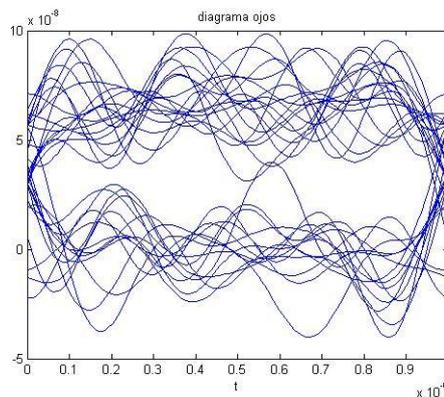


Figura 6.29. Diagrama de ojos. Señal aumentando distancia

Como se puede apreciar en la secuencia de imágenes anteriores, la señal ha sufrido una degradación considerable. El valor de ruido total obtenido ha sido de $5,3045 \cdot 10^{-15}$ A, un valor de relación señal a ruido de 8,3935 dB y una BER de 0.09375 (3 bits erróneos sobre 32 enviados).

En este caso, la degradación de la señal se debe al aumento de la distancia del enlace. El nivel de ruido obtenido ha sido menor que en el caso modelo, siendo la degradación de la señal mayor que en el anterior sistema. Esto es debido a que en el cálculo del ruido no interviene directamente la distancia del enlace, sino que interviene la potencia asociada al "1" a la entrada del receptor, de modo que al aumentar la distancia, la señal sufrirá una mayor atenuación, su valor de pico será menor y, por lo tanto, el nivel de ruido será inferior.

Al realizar el cálculo de la SNR sucede lo mismo, al enfrentar la señal atenuada frente al ruido se obtiene un valor bajo de relación señal a ruido.

Por último, en el diagrama de ojos se aprecia que se ha reducido considerablemente la apertura y que hay símbolos cuya amplitud alcanzan niveles de amplitudes de símbolos diferentes, pudiendo inducir a que se produzca un error en la decisión.

Aumento del nivel de ruido al aumentar el factor de ruido en en receptor APD

La siguiente prueba se ha realizado aumentando el factor de ruido y el factor de multiplicación del receptor APD empleado.

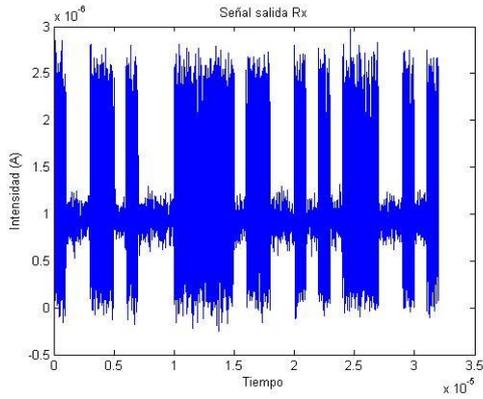


Figura 6.30. Salida rx aumentando "x" y "M"

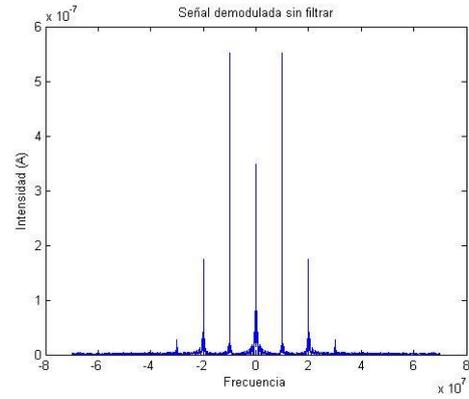


Figura 6.31. Demodulada sin filtrar.
Aumentando "x" y "M"

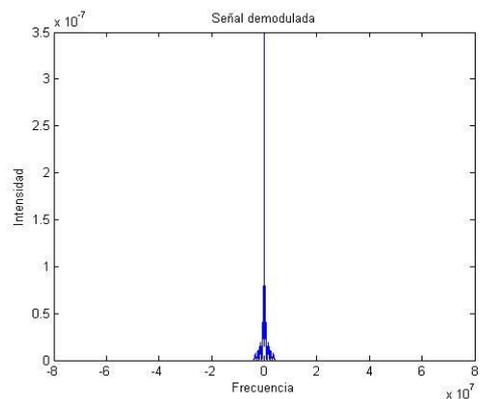


Figura 6.32. Demodulada filtrada. Aumentando "x" y "M". Dominio frecuencial

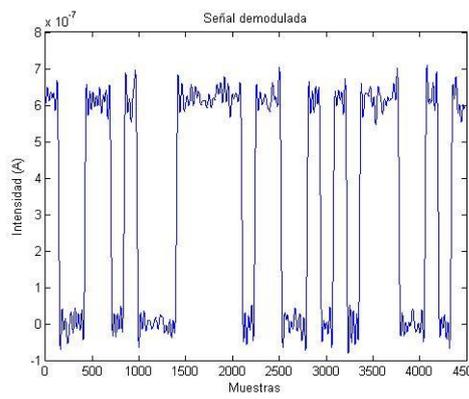


Figura 6.33. Demodulada filtrada. Aumentando "x" y "M". Dominio temporal

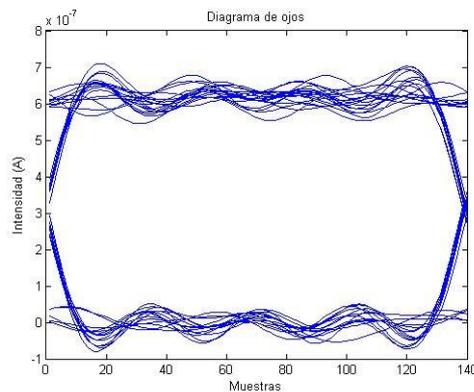


Figura 6.34. Diagrama de ojos aumentando "x" y "M"

En este caso el valor de ruido total obtenido ha sido de $1,5021 \times 10^{-14}$ A y una relación señal a ruido de 23,3941 dB.

Ahora el nivel de ruido es mayor que en el modelo del que partíamos, debido a que tanto el factor de ruido como el factor de multiplicación afectan directamente al nivel del ruido, aumentando éste considerablemente.

Sin embargo, el factor de multiplicación afecta también a la señal, aumentando el nivel de potencia de la misma. Es por ello, que pese al alto nivel de ruido obtenido, la relación SNR no decae abruptamente y se obtiene un valor razonable.

Aumento del nivel de ruido al aumentar el ancho de banda en recepción

En ese caso se ha procedido a aumentar el ancho de banda en recepción (B_e), es decir, emplear un ancho de banda mayor que el de nuestra señal.

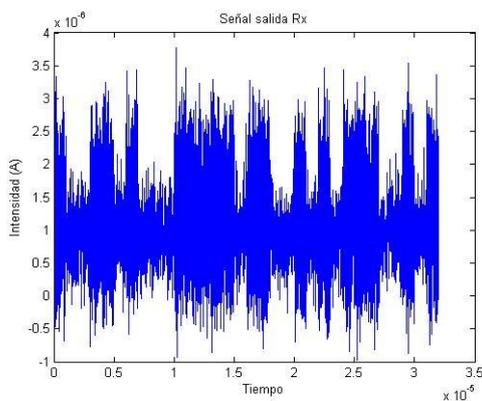


Figura 6.35. Salida Rx aumentando ancho B_e

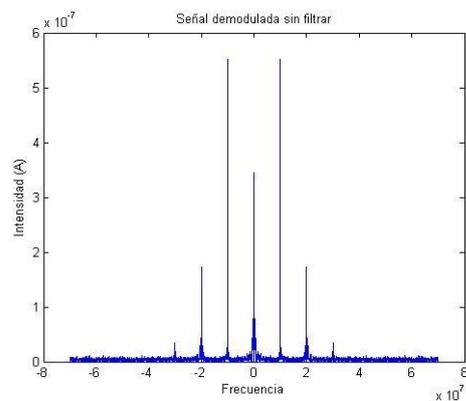


Figura 6.36. Demodulada sin filtrar aumentando B_e

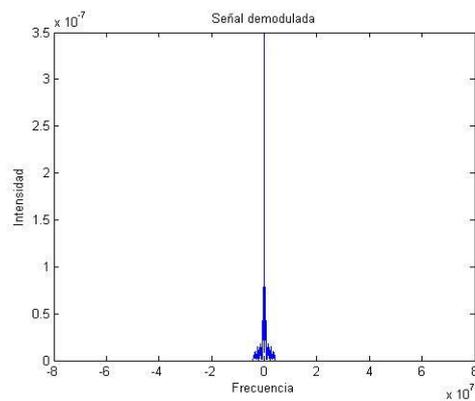


Figura 6.37. Demodulada filtrada aumentando B_e
Dominio frecuencial

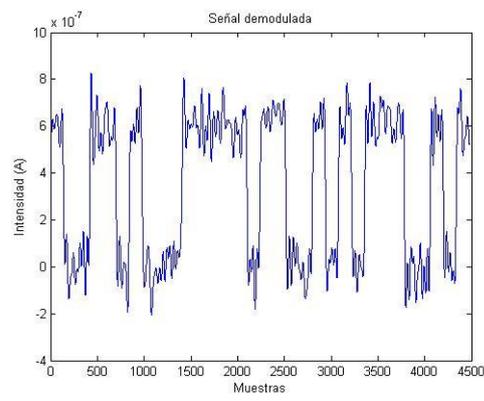


Figura 6.38. Demodulada filtrada aumentando B_e
Dominio temporal

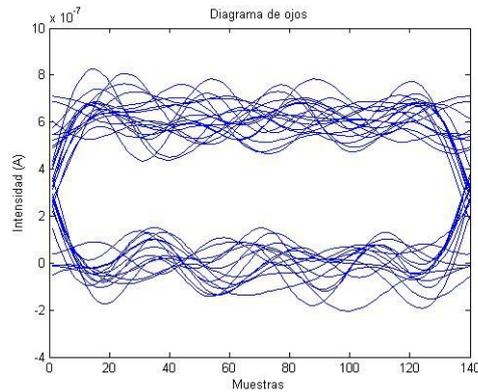


Figura 6.39. Diagrama de ojos aumentando B_e

Para esta simulación se ha obtenido un valor de ruido total de $1,5021 \cdot 10^{-13}$ A y una relación señal a ruido de 13,3941 dB.

El valor de ruido observado para esta secuencia es mayor que el de las anteriores, esto es debido a que al ampliar el ancho de banda en recepción estaremos recibiendo la misma señal, pero habremos “dejado pasar” mucho más ruido, de tal modo que el nivel de señal es el mismo, pero el de ruido será considerablemente mayor.

Con la realización de las pruebas anteriores se ha querido mostrar los diferentes parámetros que pueden hacer aumentar el ruido en un sistema de comunicaciones.

7. EVALUACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE VARIOS CANALES

Tanto el código desarrollado en Matlab como el implementado por Optilux ofrecen la posibilidad de transmitir varios canales simultáneamente a través de la misma fibra.

La principal diferencia, en cuanto al tratamiento de la transmisión de varios canales entre ambos sistemas, reside en que Optilux tiene en cuenta los efectos no lineales y la dispersión, mientras que el sistema desarrollado en Matlab considera la presencia de ruido.

A continuación se procederá a realizar una evaluación de ambos sistemas por separado.

7.1. EVALUACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE VARIOS CANALES SOBRE EL SISTEMA ROF DESARROLLADO EN MATLAB

El proceso de transmisión de varios canales simultáneamente a través de la misma fibra se encuentra íntimamente ligado al concepto de modulación, puesto que para poder llevarlo a cabo será necesario modular las diferentes señales para trasladarlas a frecuencias distintas.

Por ello, los módulos empleados en la realización de esta simulación han sido exactamente los mismos que en el anterior apartado de modulación. La única diferencia es el número de señales transmitidas.

Se ha creído conveniente realizar las pruebas para la transmisión simultánea de dos señales, aunque los resultados obtenidos son extrapolables para la transmisión de “n” señales, siempre y cuando se cumpla el espaciamiento mínimo entre ellas determinado por la fórmula:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda$$

Donde:

Δf : espaciamiento entre canales en frecuencia (Hz)

λ : longitud de onda en la que está centrada la señal (nm)

$\Delta \lambda$: espaciamiento entre canales en longitud de onda (nm)

Las secuencias o señales transmitidas empleadas en la simulación han sido las siguientes:

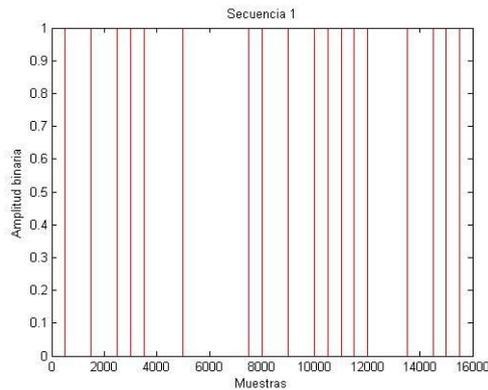


Figura 7.1. Secuencia a transmitir 1

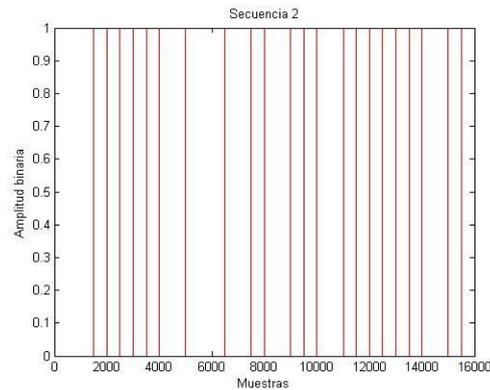


Figura 7.2. Secuencia a transmitir 2

Como se puede apreciar, el número de muestras empleadas en cada señal ha aumentado respecto a las simulaciones anteriores, esto es debido a que se van a transmitir señales con un alto régimen binario y será necesario emplear frecuencias de muestreo elevadas, de tal modo que habrá un mayor número de muestras por señal.

Modulación y transmisión

Como se ha comentado anteriormente, los módulos empleados en WDM han sido los mismos que en modulación, de modo que, el proceso de transmisión es muy similar al seguido cuando transmitíamos señales moduladas.

El primer paso que realizamos se reduce a modular independientemente las señales que deseamos transmitir. Mediante este proceso estamos trasladando cada secuencia o señal a una frecuencia.

Una vez tenemos ambas señales moduladas procedemos a sumar la una a la otra para obtener así una única señal a transmitir por el canal. La señal resultante de la suma será la que recibirá el transmisor y la que será propagada por el sistema.

A la hora de realizar la modulación de las señales a transmitir se han tenido en cuenta dos posibles casos:

- Caso 1: solamente se procede a realizar la modulación a una de las dos señales, transmitiéndose la otra sin modular, es decir, en banda base.
- Caso 2: se realiza la modulación de ambas señales.

Para la realización de las pruebas, se han empleado dos señales con una intensidad de pico de 10 mA, con un régimen binario de 2 y 5 Mbps, respectivamente. A su vez, la prueba se realizó empleando portadoras centradas en MHz y posteriormente se extrapolaron los resultados para portadoras centradas en GHz.

Caso 1:

Para el caso 1 se ha empleado una portadora de 50 MHz. La secuencia obtenida es la siguiente:

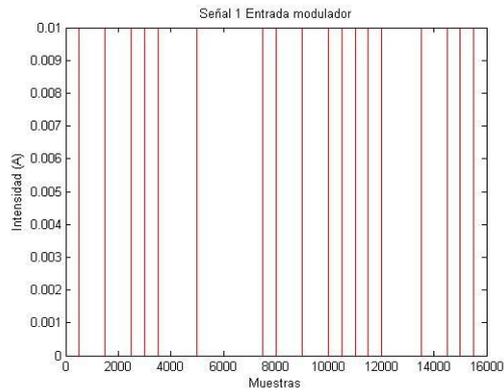


Figura 7.3. Entrada modulador señal 1

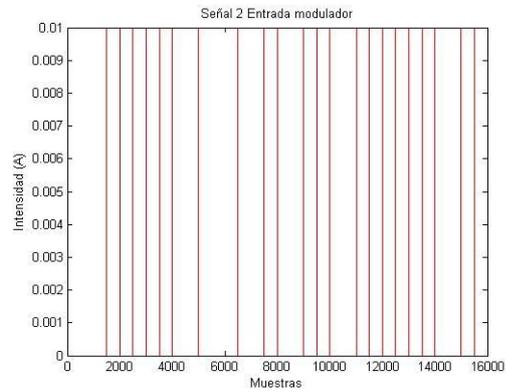


Figura 7.4. Entrada modulador señal 2

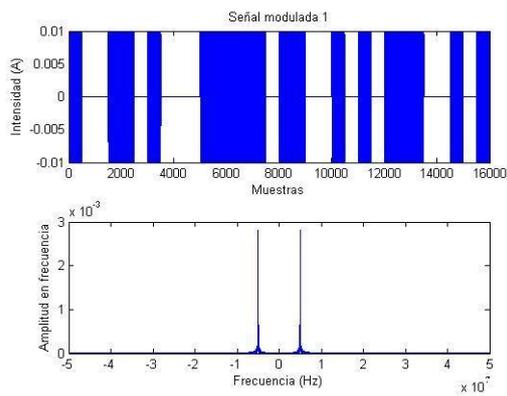


Figura 7.5. Salida modulador señal 1

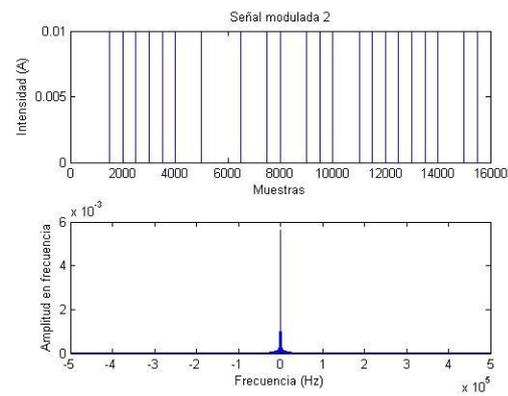


Figura 7.6. Salida modulador señal 2

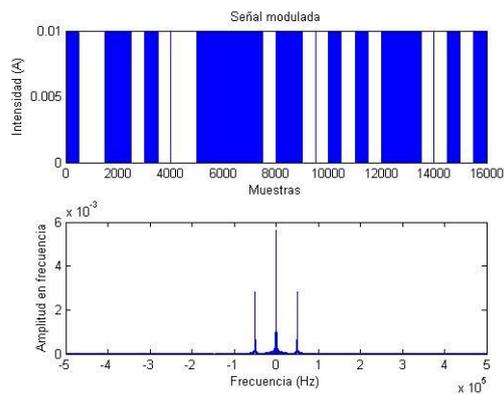


Figura 7.7. Señal modulada

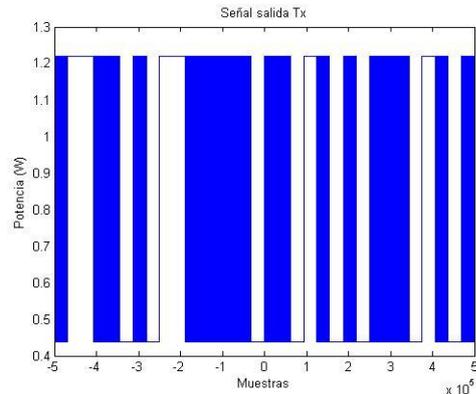


Figura 7.8. Salida tx señal modulada caso 1

Como podemos apreciar en la secuencia, la primera señal se modula por una portadora, mientras que la segunda se transmite sin modular, en banda base.

Si observamos los espectros de ambas señales, apreciamos que la primera señal ha sido trasladada a la frecuencia de su portadora, mientras que la segunda, al no poseer portadora, ha centrado su espectro en torno al cero.

En el espectro de la señal resultante podemos apreciar las componentes de las dos señales transmitidas.

Caso 2:

En este caso, la primera señal a transmitir posee un régimen binario de 2 Gbps y la segunda de 5 Gbps, y han sido moduladas por una portadora de 5 GHz y otra de 10 GHz, respectivamente. La secuencia obtenida es la siguiente:

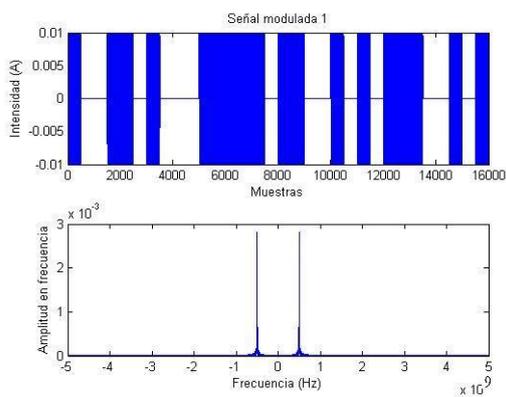


Figura 7.9. Salida modulador señal 1, caso 2

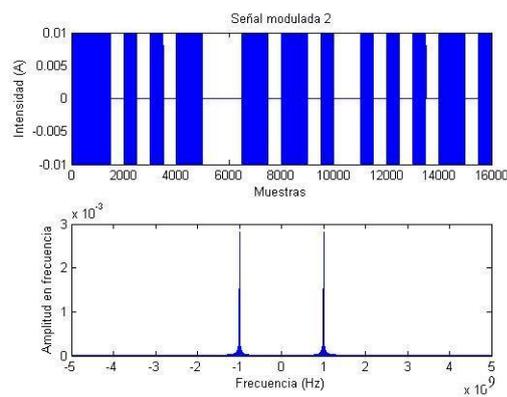


Figura 7.10. Salida modulador señal 2, caso 2

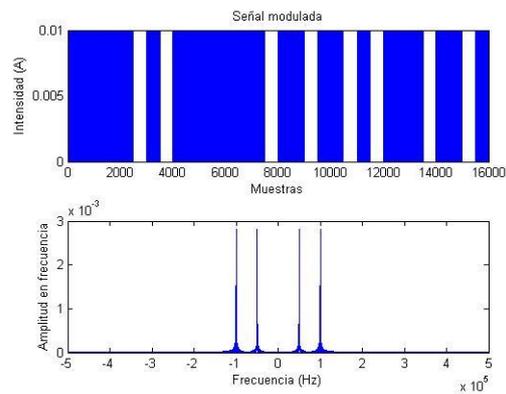


Figura 7.11. Señal modulada caso 2

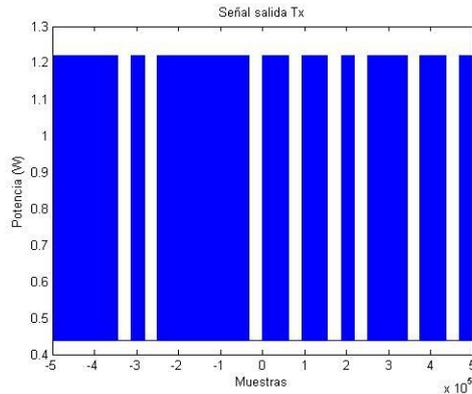


Figura 7.12. Salida tx señal modulada caso 2

Como se puede apreciar, en ese caso ambas señales han sido moduladas y trasladadas a frecuencias diferentes.

Demodulación y recepción

El proceso de demodulación y recepción llevado a cabo en WDM es análogo al realizado en el sistema de RoF sobre fibra. La diferencia reside en que, en este caso, se deberá multiplicar la señal por ambas portadoras y filtrar las resultantes para obtener las diferentes señales que componen la señal modulada.

Demodulación y recepción de la señal enviada en el caso 1:

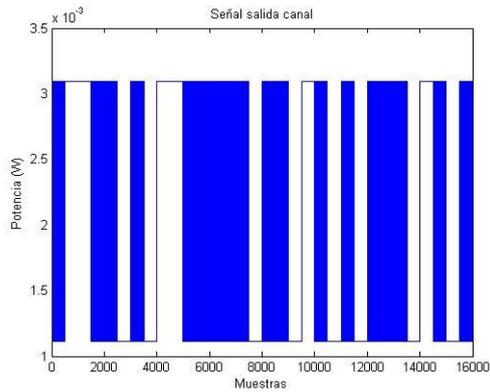


Figura 7.13. Salida canal señal caso 1

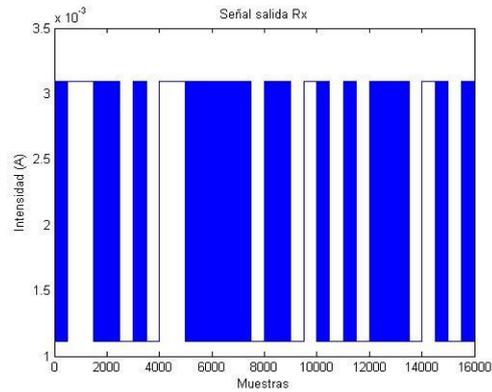


Figura 7.14. Salida Rx señal caso 1

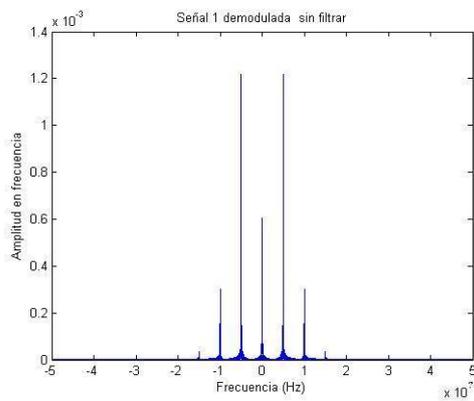


Figura 7.15 Señal 1 caso 1 demodulada sin filtrar

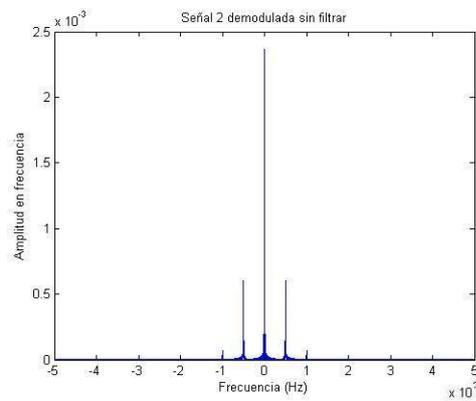


Figura 7.16. Señal 2 caso 1 demodulada sin filtrar

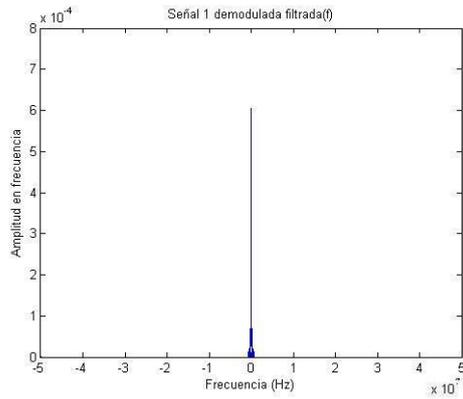


Figura 7.17 Señal 1 caso 1 demodulada filtrada.
Dominio frecuencial

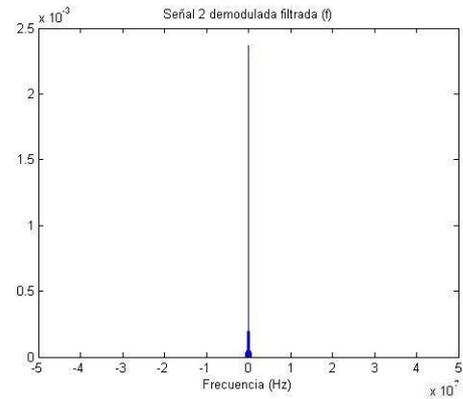


Figura 7.18. Señal 2 caso 1 demodulada filtrada.
Dominio frecuencial

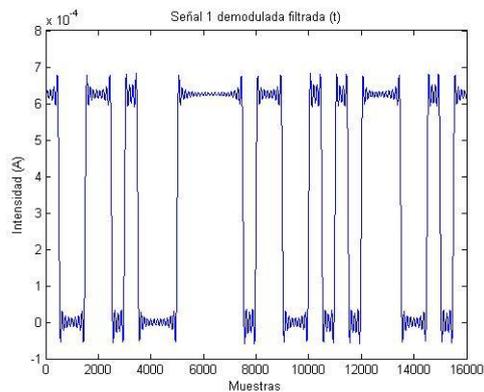


Figura 7.19 Señal 1 caso 1 demodulada filtrada.
Dominio temporal

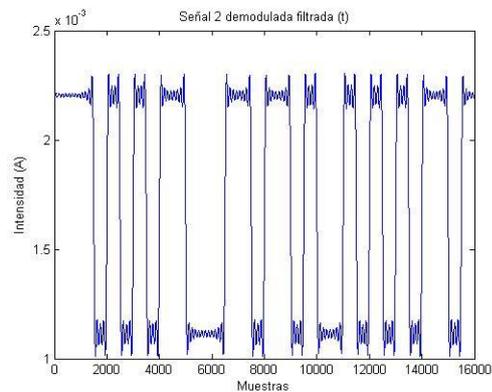


Figura 7.20. Señal 2 caso 1 demodulada filtrada.
Dominio temporal

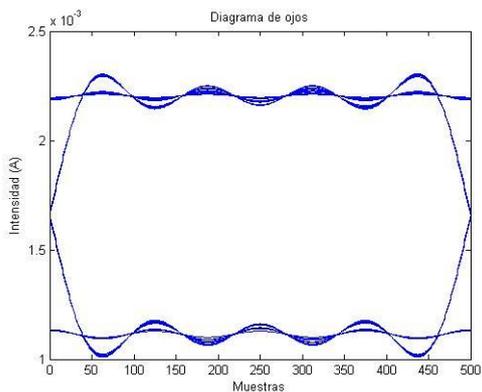


Figura 7.21. Diagrama de ojos señal 1 caso 1

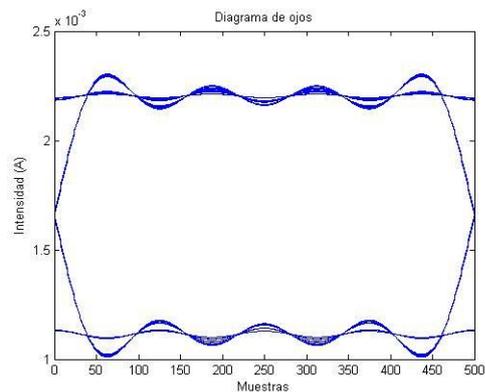


Figura 7.22. Diagrama de ojos señal 2 caso 1

En esta secuencia podemos observar cómo al multiplicar la señal modulada por la portadora aparecen componentes de la misma en frecuencias no deseadas, mientras que la información que deseamos recuperar se encuentra centrada en torno al cero.

Por ello, para recuperar la señal original es necesario realizar un filtrado paso-bajo y eliminar las componentes no deseadas.

Demodulación y recepción de la señal enviada en el caso 2:

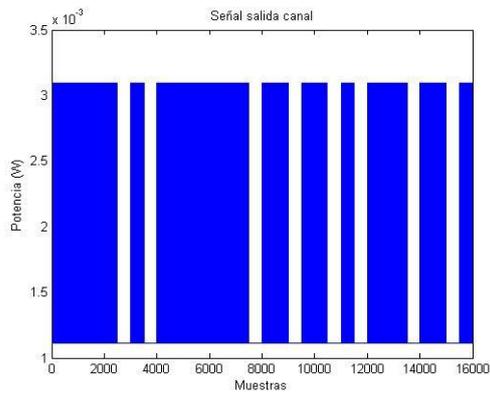


Figura 7.23. Salida canal señal caso 2

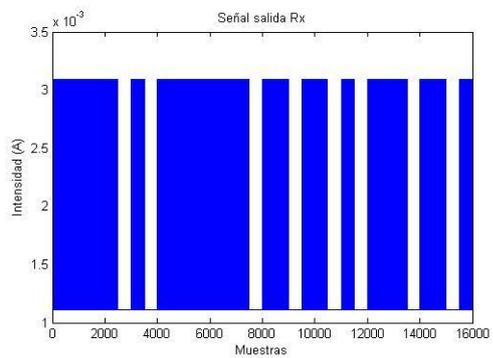


Figura 7.24. Salida Rx señal caso 2

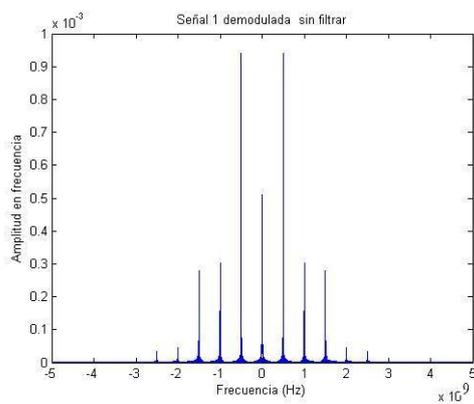


Figura 7.25. Señal 1 caso 2 demodulada sin filtrar

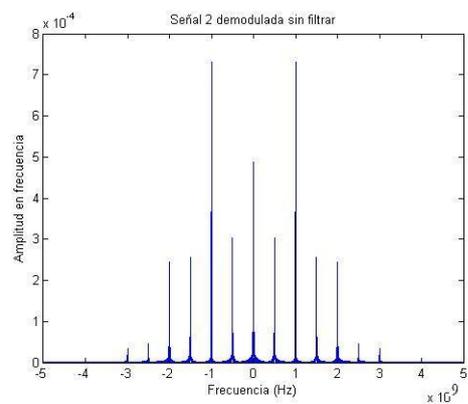


Figura 7.26. Señal 2 caso 2 demodulada sin filtrar

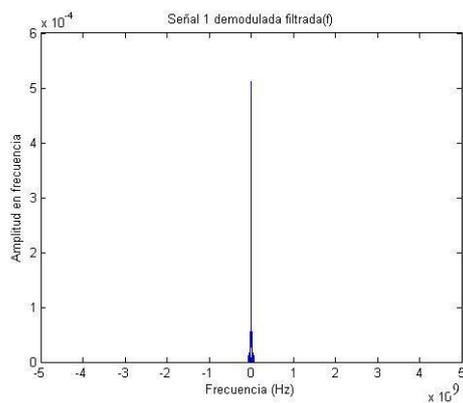


Figura 7.27. Señal 1 caso 2 demodulada filtrada.
Dominio frecuencial

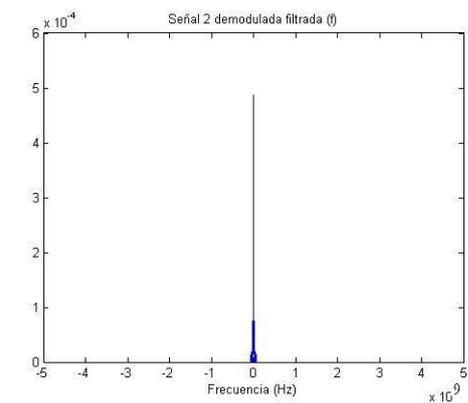


Figura 7.28. Señal 2 caso 2 demodulada filtrada.
Dominio frecuencial

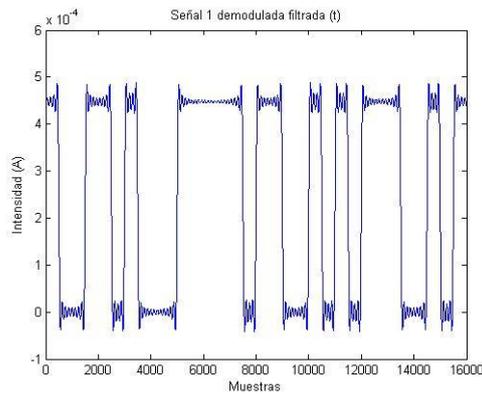


Figura 7.29 Señal 1 caso 2 demodulada filtrada.
Dominio temporal

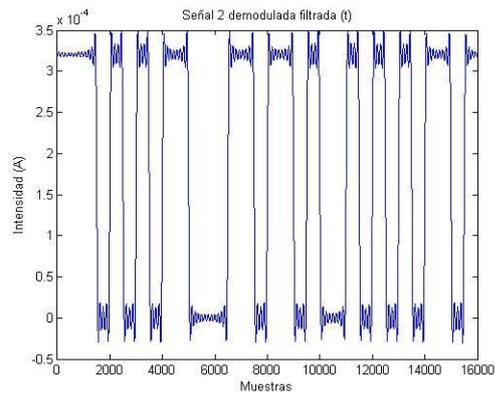


Figura 7.30. Señal 2 caso 2 demodulada filtrada.
Dominio temporal

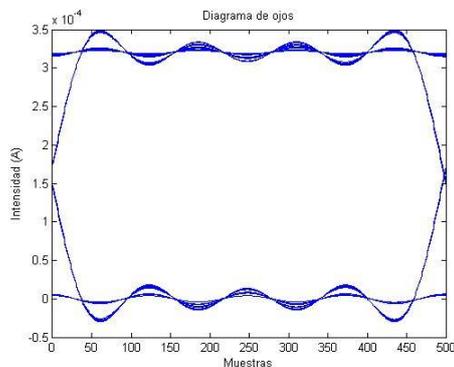


Figura 7.31. Diagrama de ojos señal 1 caso 2

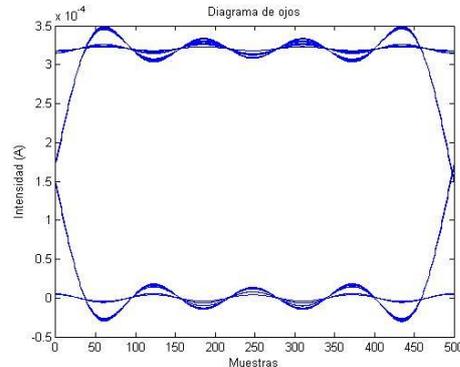


Figura 7.32. Diagrama de ojos señal 2 caso 2

Al igual que en el caso anterior, se puede observar el mismo efecto en los diagramas de ojos y en la representación temporal de la señal demodulada y filtrada.

Para ambos se consiguió una recuperación completa de las señales enviadas y se obtuvo una tasa de error de bit igual a cero.

En los dos casos se empleó un receptor PIN con responsividad igual a la unidad.

Las pruebas mostradas se han realizado para el envío de dos señales simultáneamente por el mismo canal, pero el resultado es extrapolable al envío de "n" señales.

7.1.1. Evaluación de la demodulación de varios canales con ruido aditivo transmitidos sobre el sistema RoF

Como ocurría en los casos anteriores, tanto en el sistema digital sobre fibra óptica como en el de RoF, el ruido aditivo se añade en la etapa de recepción, por lo que sólo se analizará la demodulación de la señal en presencia de ruido debido a que las etapas de transmisión y propagación por el canal permanecen inalteradas.

La demodulación en presencia de ruido es análoga a la realizada en el caso de RoF con la única excepción de que en este caso estamos transmitiendo dos señales por el canal en lugar de una.

Sin embargo se ha considerado oportuno incluir un ejemplo de demodulación en presencia de ruido.

Para la realización del ejemplo, se parte de la señal modulada en el caso dos de la anterior sección:

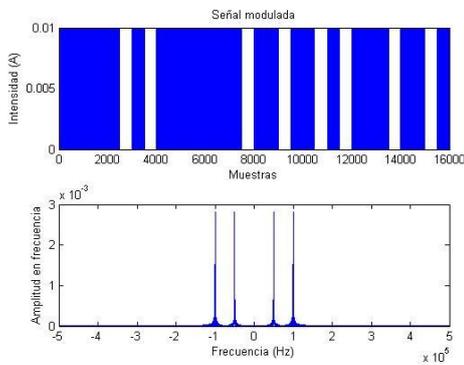


Figura 7.33. Señal transmitida modelo WDM

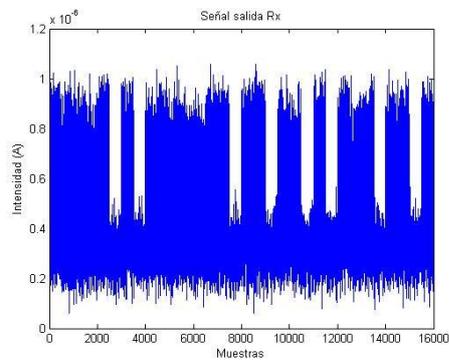


Figura 7.34. Señal salida rx con ruido aditivo

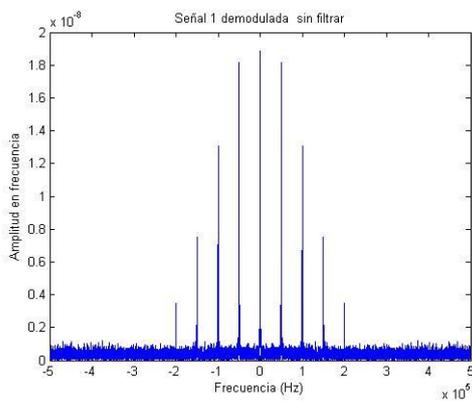


Figura 7.35. Señal 1 demodulada sin filtrar

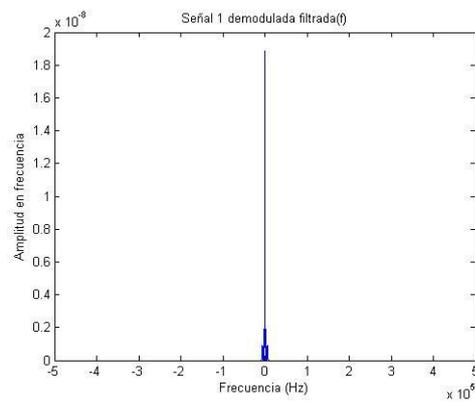


Figura 7.36. Señal 1 demodulada filtrada

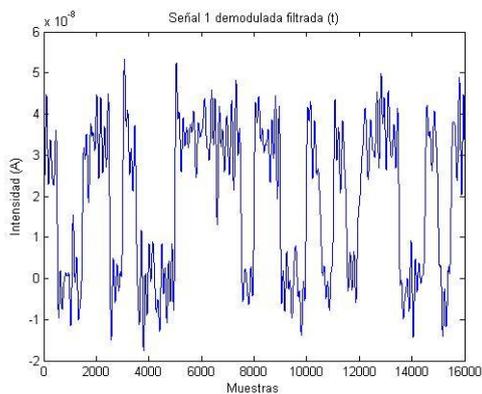


Figura 7.37. Señal 1 recuperada

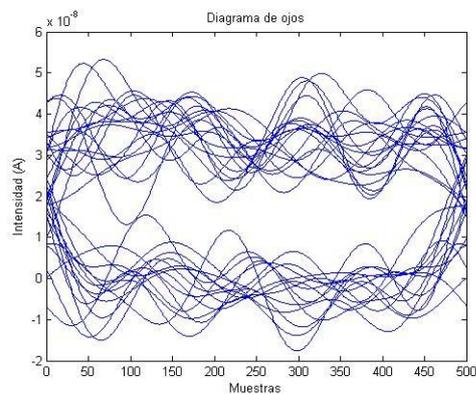


Figura 7.38. Diagrama de ojos señal 1

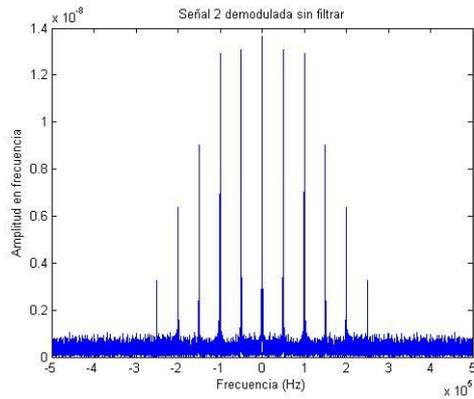


Figura 7.39. Señal 2 demodulada sin filtrar

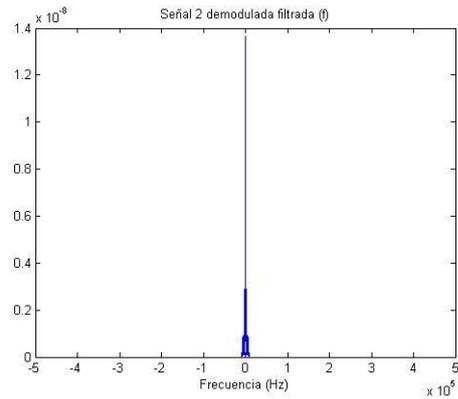


Figura 7.40. Señal 2 demodulada filtrada

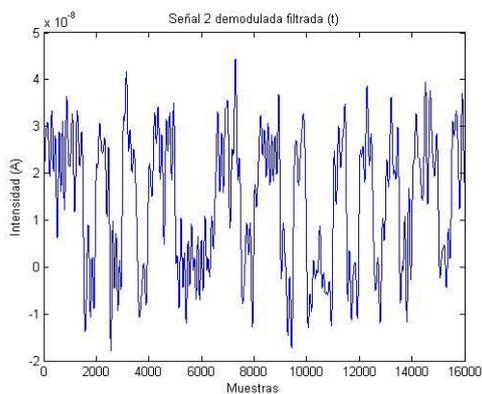


Figura 7.41. Señal 2 recuperada

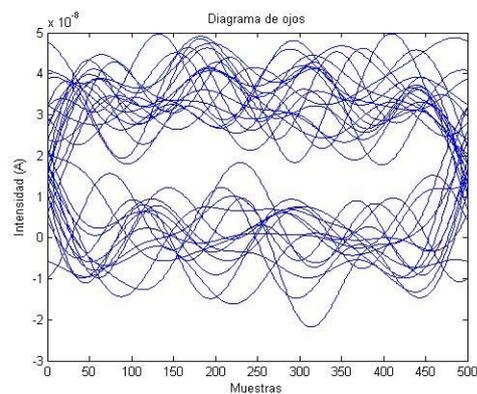


Figura 7.42. Diagrama de ojos señal 2

Como se puede apreciar en la secuencia de imágenes, los pasos a seguir son análogos a los desarrollados en el apartado de demodulación en presencia de ruido en el caso de RoF.

En el desarrollo se puede apreciar que pese a que el ruido afecta severamente a la señal recibida, es posible recuperarla sin apenas cometer error alguno.

7.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA WDM IMPLEMENTADO POR OPTILUX

Se ha creído conveniente mostrar el desarrollo que realiza Optilux para WDM, porque tiene en cuenta la dispersión y los factores no lineales.

Estas pruebas tienen como principal objetivo mostrar dichos efectos a través del software Optilux.

Dispersión:

Las pruebas se han realizado variando el número de canales transmitidos y la potencia de los mismos.

Prueba con tres canales:

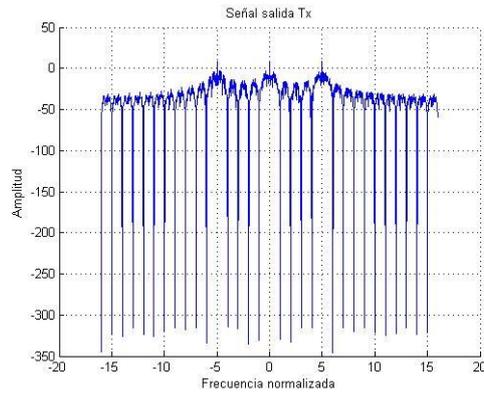


Figura 7.43. Señal compuesta por tres canales

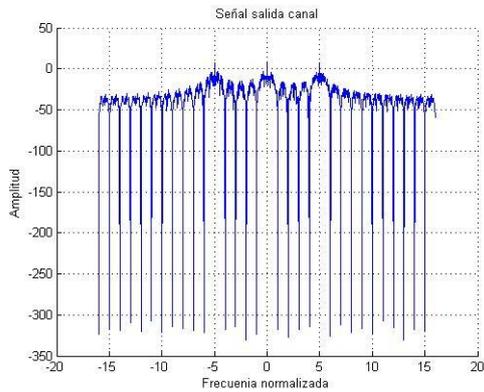


Figura 7.44. Salida 3 canales. $P_{opt.inicial}=20$ mA

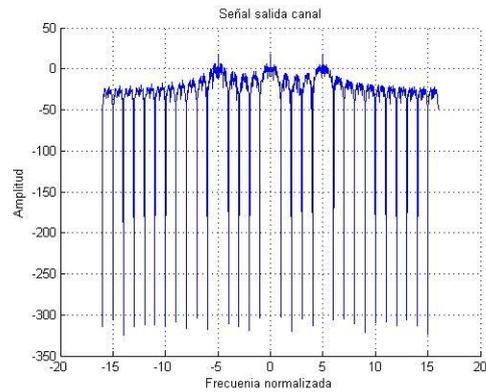


Figura 7.45. Salida 3 canales. $P_{opt.inicial}=200$ mA

Prueba con cinco canales:

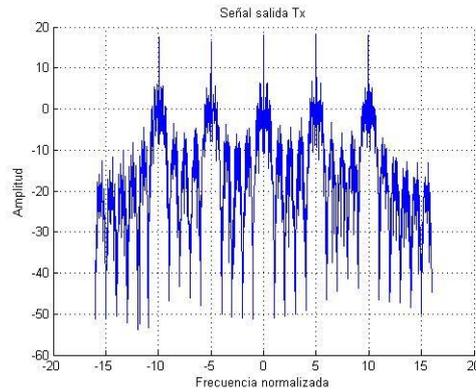


Figura 7.46. Señal compuesta por cinco canales

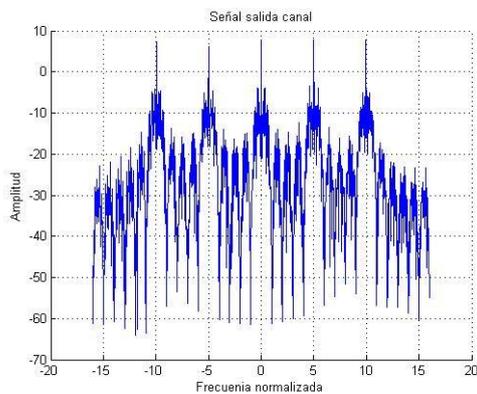


Figura 7.47. Salida 5 canales. $P_{opt.inicial}=20$ mA

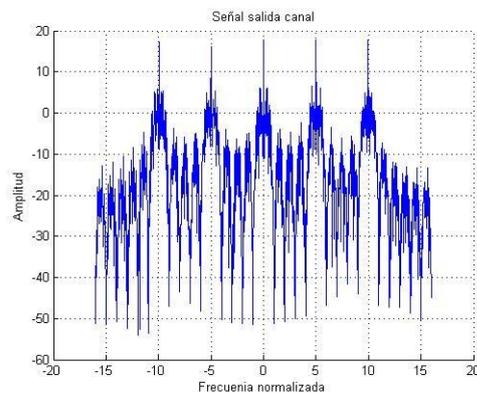


Figura 7.48. Salida 5 canales. $P_{opt.inicial}=200$ mA

Como se puede observar en las secuencias, la dispersión afecta muy levemente a la señal transmitida.

A la hora de transmitir varios canales es necesario conocer el mínimo espaciado posible entre ellos, es decir, la distancia mínima posible entre las longitudes de onda en las que se encuentran centrados para evitar que se interfieran entre sí. Dicha distancia la obtenemos mediante la siguiente expresión:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda$$

Donde:

Δf : espaciado entre canales en frecuencia (Hz).

λ : longitud de onda en la que está centrada la señal (nm).

$\Delta \lambda$: espaciado entre canales en longitud de onda (nm).

Dispersión y efectos no lineales:

A continuación se van a mostrar los efectos de la dispersión junto con los efectos no lineales en la fibra.

Prueba con tres canales:

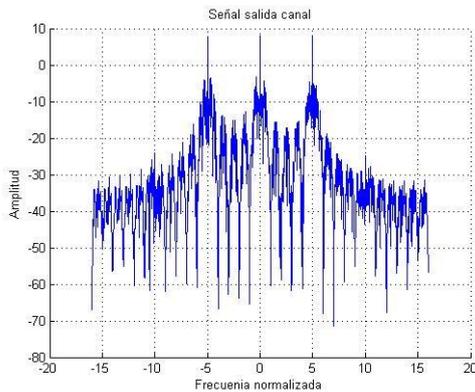


Figura 7.49. Salida 3 canales efectos no lineales mA
 $P_{opt.inicial}=20$

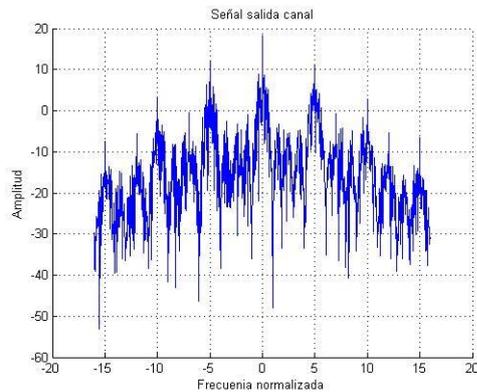


Figura 7.50. Salida 3 canales efectos no lineales
 $P_{opt.inicial}=200$ mA

Prueba con 5 canales:

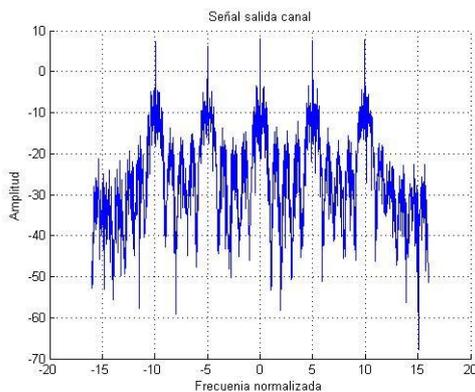


Figura 7.51. Salida 5 canales efectos no lineales mA
 $P_{opt.inicial}=20$

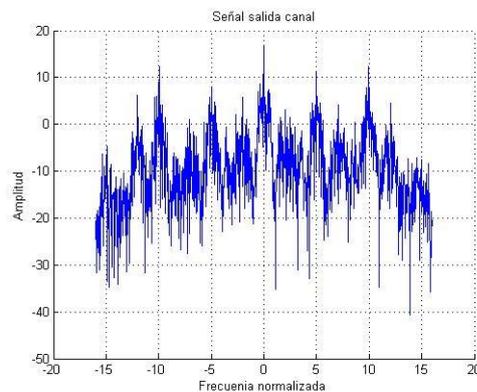


Figura 7.52. Salida 5 canales efectos no lineales
 $P_{opt.inicial}=200$ mA

Al introducir los efectos no lineales junto con la dispersión podemos apreciar una mayor degradación de la señal tras atravesar la fibra. Cuanto mayor es la potencia de la señal de entrada más acusados serán los efectos no lineales en la señal.

En el caso de la transmisión de tres canales, cuando transmitíamos con una potencia de 200 mA, se aprecia que al salir del canal todavía eran reconocibles los tres canales transmitidos, mientras que para el caso de cinco canales no podemos seguir hablando de cinco canales de transmisión debido a que no se pueden distinguir los canales de las componentes en frecuencias no deseadas.

Así mismo, se ha producido un aumento de la potencia de las componentes frecuenciales no deseadas, lo que se traduce en que puedan llegar a ser confundidas con los canales de transmisión.

No ha sido posible adjuntar ningún diagrama de ojos ya que Optilux no permite esta opción en la simulación WDM.

8. CONCLUSIONES

Mediante la realización del presente proyecto se ha conseguido implementar desde cero un sistema de comunicaciones digitales completamente funcional, diseñado en módulos independientes, capaz de simular el efecto de ruido aditivo y el cual ha servido de base para el posterior desarrollo de un sistema de radio sobre fibra (RoF).

A su vez, una vez probada la eficacia y el correcto funcionamiento del sistema RoF, se consiguió aplicar con éxito sobre el mismo la transmisión de varios canales simultáneamente.

Gracias a la implementación del sistema a partir de módulos independientes se ha conseguido evaluar el impacto de los mismos en el sistema de manera aislada.

Durante la realización del proyecto se han realizado numerosas pruebas y simulaciones para una gran diversidad de situaciones y entornos posibles. De dichas simulaciones hemos obtenido diversas conclusiones que se han ido exponiendo a continuación de los resultados de cada prueba, sin embargo cabe destacar conclusiones tales como la mayor efectividad que presenta un transmisor no lineal frente a uno lineal en un transmisor óptico, la importancia de la elección de una fibra óptica adecuada a nuestro sistema en función de las prestaciones que deseemos para el enlace (constante de atenuación) y la correcta elección del receptor.

En lo que a la elección del receptor se refiere, cabe destacar que en función del sistema y de la señal propagada por el mismo será conveniente empelar uno u otro. Un receptor APD nos proporcionará un mayor margen de entrada ya que será capaz de amplificar señales de muy baja potencia, sin embargo, también introducirá un mayor nivel de ruido en el sistema dado que también lo amplifica al igual que la señal.

Mediante el empleo de un receptor PIN se reducen los posibles niveles de potencia de la señal a la salida del canal, pero se reduce el ruido a su salida.

A raíz de la realización de las diferentes simulaciones también se ha podido comprobar y cuantificar el gran impacto que supone el ruido en los sistemas de comunicaciones digitales y cómo podrían reducirse sus efectos.

En cuanto a la transmisión de varios canales sobre el sistema RoF, cabe destacar los buenos resultados obtenidos y el buen funcionamiento del mismo, pudiéndose transmitir tantos canales como permita el ancho de banda disponible sin que haya interferencias.

Por último, también se empleó el software Optilux para realizar la simulación de los efectos no lineales que afectan a la señal durante su propagación a través de la fibra y se demostró la efectividad del mismo para tal fin.

9. TRABAJO FUTURO

A raíz de la realización del presente proyecto se han abierto nuevas líneas de investigación posibles sobre la temática tratada. Estas líneas de trabajo futuro son:

- Desarrollar el presente proyecto empleando módulos diferentes o alternativos, como por ejemplo, transmisores o receptores de características distintas a los empleados en el presente proyecto.
- Continuar el trabajo realizado incorporando la sección de radiación al medio de la señal transmitida y estudiar la propagación y recepción de la misma.
- Añadir al presente proyecto la incorporación de nuevos efectos que degraden la señal, tales como la dispersión o los efectos no lineales.
- Mejorar el código implementado por Optilux incluyendo la simulación del ruido en los sistemas.
- Partiendo del código del presente proyecto, intentar adaptarlo o aplicarlo a la transmisión de señales de distinta naturaleza (QAM, PSK, FSK,...).

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Optilux: an Open Source of Light (<http://optilux.sourceforge.net>).
- [2] Córcoles, J. "Comunicaciones ópticas". (Transparencias asignatura).
- [3] <http://pelandintecno.blogspot.com.es/2014/04/semiconductores-intrinsecos.html>.
- [4] http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-1172006000400013&script=sci_arttext.
- [5] <http://www.noticias.in.rs/ultimas/caracteristicas-del-diodo-laser>.
- [6] http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_5_3.htm.
- [7] <http://srtv-2011-2012.wikispaces.com/2.1.1+Tipos+de+filtros>.
- [8] Al-Raweshidy, H. y Komaki, S.(2002) "*Radio over Fiber Technology for the Next Generation*", Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks, Artech House (Ed) pp. 183-216.
- [9] Llorente, R. y Beltrán, M. (2010). "*Radio-over-Fibre Techniques and Performance*", Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectrics, Bishnu Pal(Ed). Universidad politécnica de Valencia. pp 120-138.
- [10] Mahros, M. y Tharwat, M. (2012). "*Implementation of a Radio-Over-Fiber OFDM Communications system*". International Journal of Advanced Computing, Engineering and Application (IJACEA). Vol. 1 No.3 .
- [11] Baghersalilmi, G. , Postoyalko, V. y O'Farrell , T. "*Modelling Laser-Diode Non-Linearity in a Radio-over-Fibre Link*". School of Electronic and Electrical Engineering. University of Leeds.
- [12] Karthikeyan, R. y Prakasa, S. (2013) "*A Survey on Radio over Fiber (RoF) for Wireless Broadband Access Technologies*". International Journal of Computer Applications. Vol. 64 No. 12.
- [13] Diodos Emisores de Luz (LED).
<http://www.uam.es/otros/masterfotonica/Documentacion/Optoelectronica/2008/5-leds.pdf>.
- [14] Wilson, J. y Hwakes, J.(1998) "Optoelectronics, an introduction". Prentice Hall.
- [15] Yariv, A. (1997). "Optical Electronics in Modern Communications". Oxford University Press.
- [16] Sanchis, E. y Ejea, J. (2011). "El diodo de emisión de Luz".
http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T3.pdf f. Universidad de Valencia.
- [17] Sanchis, E. y Ejea, J. (2011). "El diodo láser".
http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_Te.pdf f. Universidad de Valencia.

- [18] Del Pino, FJ. (2005). Introducción.
http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/transparencias/cap0.pdf.
- [19] Del Pino, FJ. (2005). Conceptos Fundamentales.
http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/transparencias/cap1.pdf.
- [20] Del Pino, FJ. (2005). Fotodetectores.
http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/transparencias/cap2.pdf.
- [21] Del Pino, FJ. (2005). Fotoemisores.
http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/transparencias/cap3.pdf.
- [22] Beltrán, M.; Morant, M.; Pérez, J.; Llorente, R. y Martí, J. (2008). “*Photonic generation and frequency up-conversion of impulse-radio UWB signals*”, Proceedings of IEEE Lasers and Electro-Optics Society. Newport Beach, California. pp. 498-499.
- [23] Dagli, N. (1999). “*Wide-Bandwidth Lasers and Modulators for RF Photonics*”. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47 No. 7. pp. 1151- 1171.
- [24] Wilson, B., Ghassemlooy, Z. y Darwazeh, I. (1995), “*Analogue Optical Fibre Communications*”. Institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom.
- [25] Shams, H., Kaszubowska-Anandarajah, A., Perry, P. y Barry, L.P. (2009a). “*Optical generation, fiber distribution and air transmission for ultra wide band over fiber system*”, Proceedings of Optical fiber communication conference. pp. 1-3. San Diego, California, United States.
- [26] Ruíz, J. “Teoría de la comunicación”. (Transparencias asignatura).
- [27] <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo357/clases/Capitulo%205.pdf>.
- [28] http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T4.pdf.
- [29] http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/transparencias/cap3.pdf.
- [30] <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/PlantelExterior/IntroduFO1.pdf>.
- [31] <http://www.uam.es/otros/masterfotonica/Documentacion/Optoelectronica/2008/5-leds.pdf>.
- [32] Vázquez, C. “Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos” Grupo de Displays y aplicaciones fotónicas. Universidad Carlos III. Madrid.

[33] Artículos 1401. “Características de las fibras Ópticas: Sobre las características geométricas, ópticas y eléctricas de las fibras ópticas. Referido a la atenuación y el ancho de banda.

[34] Fundación Telefónica. “Teoría de la fibra óptica”.

11. PRESUPUESTO

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 800€
- Material de oficina 120 €
- Total de ejecución material..... 920 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material 147 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material 55 €

4) Honorarios Proyecto

- 1250 horas a 15 € / hora 18.750€

5) Material fungible

- Gastos de impresión 60 €
- Encuadernación 200 €
- Total material fungible.....260 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 20.077 €

7) I.V.A. aplicable

- 21% Subtotal Presupuesto..... 4.216,17 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto 24.293,17 €

Madrid, Enero de 2015

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Pedro Lorenzo Gómez

Ingeniero de Telecomunicación

12. PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de la *Evaluación de Sistemas de Comunicaciones Ópticas y de Radio sobre Fibra a Través de la Caracterización de sus Diferentes Subsistemas y Dispositivos*. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos

de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.
17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.
19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.
21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.
22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.
23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.