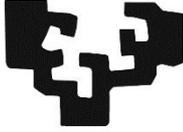


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

Solución Basada en Fibra de Plástico para la Supresión del Ruido Electromagnético en el Control de Dispositivos Electrónicos de Potencia

Trabajo de Fin de Máster

Alumno: Javier Herrera Meiro

Director: Gaizka Durana Apaolaza

Curso Académico: 2016/2017

Contenido

| | |
|---|----|
| Índice de Figuras | 3 |
| Índice de Tablas | 4 |
| Lista de Acrónimos | 5 |
| Resumen..... | 6 |
| Laburpena..... | 7 |
| Abstract..... | 8 |
| 1. Introducción..... | 9 |
| 2. Contexto | 10 |
| 3. Objetivos..... | 11 |
| 3.1. Objetivo principal | 11 |
| 3.2. Objetivos secundarios | 11 |
| 4. Alcance..... | 12 |
| 5. Beneficios | 13 |
| 6. Estado del Arte..... | 14 |
| 6.1. Multiplexación por División en Longitud de Onda | 14 |
| 6.2. Fibra Óptica de Plástico..... | 15 |
| 6.3. Filtros..... | 16 |
| 6.4. Estudios anteriores de redes WDM sobre POF | 18 |
| 7. Análisis de Alternativas | 21 |
| 7.1. Fuentes de Luz | 21 |
| 7.2. Fotodetectores | 23 |
| 7.3. Filtros..... | 25 |
| 7.3.1. Filtros Rosco..... | 25 |
| 7.3.2. Filtros Andover Corporation | 28 |
| 8. Análisis de riesgos | 31 |
| 9. Metodología..... | 33 |
| 9.1. Tareas | 33 |
| 9.1.1. Paquete de Trabajo 1: Gestión del proyecto | 33 |
| 9.1.2. Paquete de Trabajo 2: Estudios previos | 34 |
| 9.1.3. Paquete de Trabajo 3: Selección de equipos | 34 |
| 9.1.4. Paquete de Trabajo 4: Gestión de pedidos | 35 |
| 9.1.5. Paquete de Trabajo 5: Caracterización del material y simulación | 35 |
| 9.1.6. Paquete de Trabajo 6: Montaje y Pruebas | 36 |
| 9.1.7. Paquete de Trabajo 7: Redacción de la memoria y correcciones del sistema | 37 |
| 9.1.8. Diagrama de Gantt | 38 |

| | | |
|---------|--|----|
| 9.2. | Equipos | 40 |
| 9.3. | Procedimientos | 42 |
| 9.3.1. | Medición de potencia acoplada a la fibra..... | 42 |
| 9.3.2. | Caracterización de Filtros de lámina..... | 42 |
| 9.3.3. | Caracterización de filtros de cristal | 43 |
| 9.3.4. | Pérdidas introducidas por cada elemento..... | 43 |
| 9.3.5. | Medidas del sistema completo | 44 |
| 10. | Cálculos teóricos | 45 |
| 10.1. | Balace de potencias..... | 45 |
| 10.2. | Ancho de banda del sistema..... | 47 |
| 10.2.1. | Dispersión introducida por la fibra | 48 |
| 10.2.2. | Tiempo de subida del fotodetector | 49 |
| 10.2.3. | Tiempo de subida de los transmisores..... | 49 |
| 10.2.4. | Cálculo del ancho de banda garantizado del sistema | 50 |
| 11. | Resultados..... | 51 |
| 11.1. | Potencia acoplada a la fibra..... | 51 |
| 11.2. | Efectividad de Filtros Rosco | 52 |
| 11.3. | Efectividad de filtros Andover | 55 |
| 11.4. | Pérdidas del sistema óptico | 57 |
| 11.4.1. | Pérdidas Multiplexor/Demultiplexor | 57 |
| 11.4.2. | Pérdidas conector SMA-SMA..... | 58 |
| 11.4.3. | Pérdidas del sistema completo..... | 58 |
| 11.4.4. | Medidas de funcionamiento..... | 59 |
| 11.4.5. | Recuperación de las señales por software | 61 |
| 12. | Resumen de Gastos..... | 64 |
| 12.1. | Gastos | 64 |
| 12.2. | Subcontrataciones | 65 |
| 12.3. | Amortizaciones..... | 65 |
| 12.4. | Recursos Humanos..... | 65 |
| 12.5. | Gastos indirectos..... | 65 |
| 12.6. | Imprevistos | 65 |
| 12.7. | Total..... | 66 |
| 13. | Conclusiones | 67 |
| | Referencias..... | 68 |
| | ANEXO | 69 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Circuito electrónico del grupo APERT | 10 |
| Figura 2: Esquema básico WDM con 4 señales..... | 15 |
| Figura 3: Atenuación de las POF en longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano | 16 |
| Figura 4: Curva de transmisión para el filtro FGUV11S de Thorlabs..... | 17 |
| Figura 5: Espectro de emisión y demultiplexación de 4 canales LED | 18 |
| Figura 6: Función de transferencia de un multiplexor/demultiplexor de 5 canales..... | 19 |
| Figura 7: Espectros de emisión y especificaciones de los LED IF-E92A (continua) e IF-92B (discontinua)..... | 21 |
| Figura 8: Espectro de emisión y especificaciones del LED IF-E93..... | 22 |
| Figura 9: Espectro de emisión y especificaciones del LED IF-E97..... | 22 |
| Figura 10: Espectro de emisión y especificaciones del LED IF-E91D..... | 22 |
| Figura 11: Circuito controlador del LED IF-E93..... | 23 |
| Figura 12: Responsividad respecto a la longitud de onda del fotodetector PDA100-EC de Thorlabs..... | 24 |
| Figura 13: Responsividad y especificaciones del fotodetector IF-E91D..... | 24 |
| Figura 14: Responsividad y especificaciones del fotodetector IF-E92D..... | 25 |
| Figura 15: Filtros Azules Rosco e-colour | 26 |
| Figura 16: Filtros verdes Rosco e-colour | 27 |
| Figura 17: Filtros rojos Rosco e-colour | 27 |
| Figura 18: Filtros amarillos Rosco e-colour | 28 |
| Figura 19: Curva de transmisión del filtro 470FS10 | 29 |
| Figura 20: Curva de transmisión del filtro 523FS10 | 30 |
| Figura 21: Curva de transmisión del filtro 650FS20 | 30 |
| Figura 22: Curva de transmisión del filtro 870FS10 | 30 |
| Figura 23: Diagrama de Gantt..... | 39 |
| Figura 24: Fuente de alimentación Agilent E36210A (izda) y Generador de Funciones Keysight 33210A (dcha) | 40 |
| Figura 25: Osciloscopio Agilent DSO3102A (izda) y Multímetro Keysight 34410 ^a (dcha) | 41 |
| Figura 26: Potencia acoplada a la fibra por cada LED | 51 |
| Figura 27: Transmisión de filtros rojos Rosco e-colour+ para cada LED..... | 52 |
| Figura 28: Transmisión de filtros verdes Rosco e-colour+ para cada LED..... | 53 |
| Figura 29: Transmisión de filtros azules Rosco e-colour+ para cada LED..... | 54 |
| Figura 30: Transmisión de filtros amarillos Rosco e-colour+ para cada LED..... | 54 |
| Figura 31: Transmisión de los filtros de la solución óptima con filtros Rosco..... | 55 |
| Figura 32: Porcentaje de transmisión de los filtros de Andover Corporation..... | 56 |
| Figura 33: Pérdidas de inserción en dB del multiplexor (dcha-oscuro) y demultiplexor (izda-claro) para cada LED | 57 |
| Figura 34: Pérdidas totales en dB del sistema óptico completo..... | 58 |
| Figura 35: Señal moduladora vs recibida del LED rojo con ganancia de 30 dB..... | 59 |
| Figura 36: Señal moduladora vs recibida del LED azul con ganancia de 30 dB..... | 60 |
| Figura 37: Señal moduladora vs recibida del LED verde con ganancia de 40 dB..... | 61 |
| Figura 38: Señal recibida y reconstruida para el LED rojo..... | 62 |
| Figura 39: Señal recibida y reconstruida para el LED Azul..... | 62 |
| Figura 40: Señal recibida y reconstruida para el LED Verde | 63 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Pre selección de filtros Rosco e-colour | 26 |
| Tabla 2: Propiedades de los filtros de Andover Corporation | 29 |
| Tabla 3: Responisividad del fotodetector PDA100A-EC para diferentes longitudes de onda | 42 |
| Tabla 4: Potencia teórica acoplada a la fibra y atenuación de la fibra para cada longitud de onda | 45 |
| Tabla 5: Pérdidas totales del sistema para cada LED y tipo de filtrado | 47 |
| Tabla 6: Potencias recibidas para cada LED y tipo de filtrado | 47 |
| Tabla 7: Coeficiente de dispersión material para cada longitud de onda | 48 |
| Tabla 8: Tiempos de subida de cada LED de Industrial Fiberoptics | 49 |
| Tabla 9: Pérdidas del conector SMA-SMA para cada LED | 58 |
| Tabla 10: Partida de Gastos | 64 |
| Tabla 11: Partida de amortizaciones | 65 |
| Tabla 12: Partida de recursos humanos | 65 |
| Tabla 13: Coste total del proyecto | 66 |
| Tabla 14: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED azul | 69 |
| Tabla 15: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED azul . | 69 |
| Tabla 16: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED verde | 69 |
| Tabla 17: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED verde | 70 |
| Tabla 18: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED rojo | 70 |
| Tabla 19: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED rojo .. | 70 |
| Tabla 20: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED infrarrojo | 70 |
| Tabla 21: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED infrarrojo | 70 |
| Tabla 22: porcentaje de transmisión de cada filtro para el LED azul | 71 |
| Tabla 23: porcentaje de transmisión de cada filtro para el LED verde | 72 |
| Tabla 24: porcentaje de transmisión de cada filtro para el LED rojo | 72 |
| Tabla 25: Porcentaje de transmisión con cada combinación de filtros para el LED rojo | 73 |
| Tabla 26: Porcentaje de transmisión con cada combinación de filtros para el LED azul | 73 |
| Tabla 27: Porcentaje de transmisión con cada combinación de filtros para el LED verde | 73 |
| Tabla 28: Porcentaje de transmisión del filtro Azul de Andover | 73 |
| Tabla 29: Porcentaje de transmisión del filtro Verde de Andover | 73 |
| Tabla 30: Porcentaje de transmisión del filtro Rojo de Andover | 74 |
| Tabla 31: Porcentaje de transmisión del filtro Infrarrojo de Andover | 74 |
| Tabla 32: Valores de tensión medidos para cada LED insertando el multiplexor | 74 |
| Tabla 33: Valores de tensión medidos para cada LED insertando el demultiplexor | 74 |
| Tabla 34: Pérdidas introducidas por el multiplexor para cada LED | 75 |
| Tabla 35: Pérdidas introducidas por el demultiplexor para cada LED | 75 |

Lista de Acrónimos

WDM: Wavelength Division Multiplexing

LED: Light Emitting Diode

POF: Plastic Optical Fiber

PWM: Pulse-Width Modulation

PMMA: Polymethyl Methacrylate

DC: Direct Current

AC: Alternating Current

SI: Step Index

GI: Graded Index

IR: Infrarrojo

PT: Paquete de Trabajo

Resumen

La fibra óptica ha sustituido en muchos sistemas de telecomunicaciones al cable de cobre por las mejoras que introduce, entre ellas una mayor capacidad de transmisión y la supresión de interferencias electromagnéticas. Para explotar aún más las capacidades de la fibra, existe una técnica denominada Multiplexación por División en Longitud de Onda, más conocida como WDM (Wavelength Division Multiplexing) que permite combinar varias señales sobre una única fibra. De ese modo, se consigue la transmisión simultánea de información proveniente de diferentes fuentes sin que se produzcan interferencias entre las diferentes señales. En la práctica, esto implica multiplicar la tasa de bits que puede transmitirse por una única fibra

En este documento se propone un sistema de transmisión de 3 señales ópticas sobre una fibra óptica de plástico empleando la técnica WDM. Se ha fabricado un diseño de bajo coste que emplea fuentes LED que emiten en el espectro visible (470 nm, 530 nm y 650 nm). Para unir las tres señales en una fibra óptica de plástico (POF) se ha empleado un acoplador, utilizándose otro idéntico para separarlas en tres ramas antes de alcanzar el receptor. Debido a que los acopladores no son capaces de separar cada señal por una rama, es necesario aplicar un filtrado para obtener una de ellas en cada receptor.

Empleando filtros de bajo coste consistentes en láminas semitransparentes de colores se ha demostrado que el sistema óptico planteado es capaz de transportar tres señales diferentes evitando interferencias por ruido electromagnético. En la etapa de recepción se obtienen señales con bajo nivel de tensión que, no obstante, pueden ser recuperadas con una forma casi idéntica a las transmitidas.

Laburpena

Telekomunikazio sistema askotan kobrezko kable tradizionalak zuntz optikoen ordeztatu dira, batez ere euren transmisio ahalmen handiagatik eta interferentzia elektromagnetikoen aurkako babesengatik. Bere ezaugarriei errendimendu gehiago ateratzeko WDM (Wavelength Division Multiplexing) izeneko teknika garatu da, zuntz bakarrean seinale bat baino gehiago eramateko aukera ematen duenak. Horrela, iturri ezberdinetatik datozen seinaleak batera transmititu daitezke euren artean inolako interferentzia elektromagnetikoak sortu gabe. Honek esan nahi du zuntz batean eraman daitekeen bit- tasa biderkatzea posiblea dela.

Dokumentu honetan proposatzen den sistemak hiru seinale optikoa transmititzen ditu plastikozko zuntz optiko (POF) bakarrean WDM teknika erabiliz. Igorle bezala hiru LED erabili dira, 470 nm, 530 nm eta 650 nm-ko uhin luzeran emititzen dutenak. Akopladore bat erabili da hiru seinaleak zuntz bakarrean batzeko, eta beste bat sistemaren beste muturrean berriro banatzeko hartzailleengana iritsi baino lehen. Akopladore hauek ez dute seinale bakoitza bide batetik bidaltzen, horren ordeztu seinalea hainbat zatitan banatzen ditu kolore guztiak nahasita. Horregatik iragazkiak behar dira, hartzaille bakoitzean seinale bakarra pasatu ahal izateko beste guztiak blokeatzen. Seinale optikoa elektriko bihurtzeko fotodetektoreak erabiltzen dira iragazkiak eta gero.

Iragazki gisa koloreetako lamina gardenak erabiliz, erakutsi daiteke kostu txikiko sistema honek hiru seinale ezberdin eraman ditzakela interferentziarik gabe. Hartzailleentzako etapen lortzen diren seinaleek korrante maila txikia badaukate ere, arazo hau anplifikazio elektrikoekin konpondu daiteke.

Abstract

Copper cable has been replaced by optical fiber in many telecommunications systems due to its improvements, such a greater transmission throughput and the capability to avoid electromagnetic interferences. Furthermore, there is a technique which offers the possibility of combining several light signals in a single fiber called Wavelength Division Multiplexing (WDM). In this way, information coming from different sources can be carried without interferences between them. In summary, using this technique the bit rate that of a single fiber is multiplied.

In this document a 3-channel optical system over plastic optical fiber (POF) is proposed, which uses WDM. A low-cost design has been designed and manufactured with 3 LED sources emitting in the visible spectrum at 470 nm (blue), 530 nm (green) and 650 nm (red). Two couplers are added to join 3 input signals in a single fiber (multiplexing) and to divide them in three branches before reaching the receiver (demultiplexing). These kind of couplers cannot separate each signal in a different fiber so some kind of filtering is required for this issue. Photodetectors are used as receivers, as they transform the received light signal in an electrical one.

Experimental works have probed that using low cost thin film colour filters, the provided system is able to transport 3 different light input signals without any type of electromagnetic interference. The received signals have a low voltage level, but they can be recovered using electrical amplifiers.

1. Introducción

La fibra óptica es un medio para transportar señales que cada vez se encuentra más presente tanto en entornos industriales como domésticos. Se trata de un filamento de pequeño diámetro (en muchas ocasiones del orden de las micras) por el que viajan pulsos de luz. El empleo de señales de luz en lugar de señales eléctricas les confiere una serie de ventajas sobre el cable de cobre, como mayor velocidades de datos, menor tamaño y supresión de interferencias electromagnéticas; que han provocado su sustitución en favor de la fibra en muchos sistemas de comunicaciones [1].

Además de sus ventajas intrínsecas, existe una técnica que permiten obtener un mayor rendimiento en la utilización de fibras ópticas, denominada multiplexación por división en longitud de onda o WDM (Wavelength Division Multiplexing). Esta tecnología permite enviar varias señales sobre una única fibra sin que aparezcan interferencias u otros efectos que provoquen la degradación de unas sobre otras. El principio sobre el que se basa WDM es el empleo de fuentes con diferentes longitudes de onda (pudiendo estar estas muy separadas o juntas en el espectro), combinar todas ellas en una sola fibra y finalmente, separarlas para enviar cada una a un receptor óptico. A esta combinación de varias señales en un solo medio se le llama multiplexación en el ámbito de telecomunicaciones.

Por otro lado, existe un tipo de fibra fabricada con plástico, denominada POF (Plastic Optical Fiber), normalmente más gruesa que una fibra de cristal pudiendo alcanzar diámetros de un milímetro. Las POF sufren mayor atenuación que las fibras de cristal, pero pueden curvarse con un radio menor debido a su flexibilidad y tienen un coste inferior. Estas ventajas le impulsan a considerarse como una solución real para muchos sistemas de corto alcance, como comunicaciones en el interior de vehículos o aviones.

La alta atenuación de las POF evita que se utilicen para transmisiones de largo alcance, sólo en el espectro visible tienen una atenuación aceptable que ronda los 100 dB/km. En este trabajo se van a emplear fuentes que emitan luz en dicho espectro, o lo más cerca posible (infrarrojo cercano), para construir un sistema de transmisión WDM sobre POF. Para abaratar sus costes, se van a emplear fuentes LED que, a pesar de emitir con una anchura espectral mayor que los diodos láser, son válidas debido a la gran separación que hay entre sus longitudes de onda centrales de emisión.

2. Contexto

El proyecto tiene sus orígenes en solucionar un problema que se ha planteado en el grupo de investigación APERT de la ETSI de Bilbao. En sus instalaciones se trabaja con circuitos electrónicos que se encargan de transformar la corriente DC creada en las baterías a corriente AC para alimentar motores. Para manejar el comportamiento de dichos circuitos se necesitan otros circuitos controladores que han de transmitirle señales con dicho propósito mediante una modulación PWM. Por tanto, en el sistema existen dos tipos de señales: las de potencia y las de control. En la Figura 1 se muestra parte del sistema explicado, los cables de diferentes colores son los que transportan las señales de control.

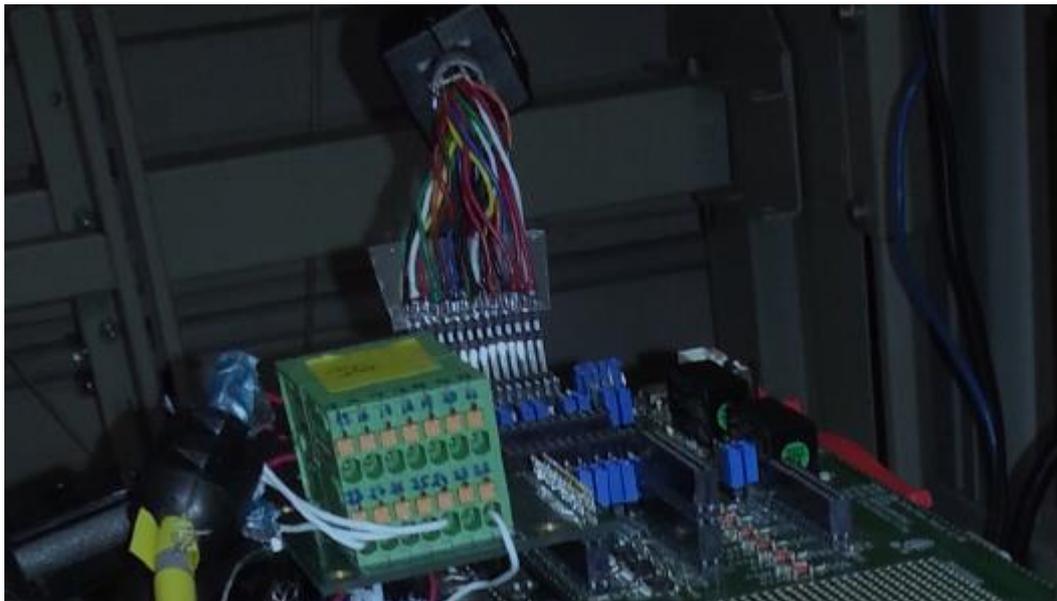


Figura 1: Circuito electrónico del grupo APERT

La utilización de cables de cobre conlleva que las señales de alta potencia provoquen interferencias electromagnéticas que se acoplan en las señales de control, estropeándolas completamente. Por ello, es necesario sustituir los cables tradicionales por otra solución que evite este tipo de interferencias entre señales.

La fibra óptica es una buena opción puesto que las señales luminosas que transporta no se ven afectadas por interferencias electromagnéticas. No obstante, conviene dar un paso más e introducir el concepto de WDM para, además de solucionar el problema planteado, disminuir el número de cables (en este caso fibras) del sistema.

3. Objetivos

3.1. Objetivo principal

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y montar un sistema óptico basado en multiplexación por división de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) que transporte tres señales ópticas sobre una única fibra óptica de plástico. Este sistema se utilizará para transportar en el dominio óptico señales provenientes del controlador de un sistema electrónico de potencia para evitar interferencias electromagnéticas.

3.2. Objetivos secundarios

Los objetivos secundarios son aquellos relativos a estudios sobre los materiales, dispositivos y técnicas utilizadas en el proyecto, enumerados a continuación:

- Análisis de la degradación de una señal por la doble transformación a la que se ve sometida, del dominio eléctrico al óptico y viceversa.
- Observar el efecto de una fibra óptica de plástico sobre una señal óptica acotada en el espectro visible, aprox. desde 400 hasta 700 nm.
- Estudio de la técnica WDM, donde se engloba el ensanchamiento de los pulsos de cada longitud de onda y los posibles solapes entre ellos, las pérdidas de potencia causadas por la inserción de multiplexores/demultiplexores y el efecto de los filtros empleados en recepción.
- Valorar la utilidad de la técnica WDM en el entorno especificado en el proyecto, comparando el rendimiento del diseño propuesto frente al original.
- Analizar y comparar el rendimiento de diferentes tipos de filtros, atendiendo en cada caso a las pérdidas introducidas para la señal de interés y su capacidad de bloqueo para el resto.

4. Alcance

Diseñar y montar un sistema óptico con 3 fuentes de luz de diferentes longitudes de onda cuyas señales emitidas sean multiplexadas en sola fibra de plástico, de al menos 2 metros de longitud, y demultiplexadas y filtradas en el extremo opuesto. El sistema debe tener un ancho de banda igual o superior a 20 kHz y realizarse empleando materiales con el menor coste posible. Todo ello debe ser finalizado antes del día 27 de septiembre de 2017.

5. Beneficios

En este apartado se van a enumerar los beneficios que se obtienen al sustituir un sistema de transporte de señales eléctricas mediante cables de cobre por otro que emplea fibra óptica. Los más significativos son los siguientes:

1. Supresión de interferencias electromagnéticas

Las interferencias electromagnéticas se refieren a cualquier campo electromagnético que afecte a una señal eléctrica que se esté transmitiendo por un medio. Cuando se emplean cables de cobre para transmitir señales eléctricas, los propios cables actúan de antena emitiendo campos electromagnéticos a cables adyacentes y absorbiendo otros. Estos campos, que también pueden provenir de otros dispositivos eléctricos ajenos al propio sistema, interfieren con las señales eléctricas que transportan los cables provocando errores en la transmisión.

La fibra óptica suele estar compuesta por cristal o plástico (caso de las POF), siendo ambos materiales dieléctricos y por tanto no se ven afectados por campos electromagnéticos provenientes del exterior.

2. Reducción del espacio ocupado y número de cables

Para mitigar el efecto de las interferencias electromagnéticas los cables de cobre se suelen separar unos de otros. Debido a que la fibra óptica no se ve afectada, pueden colocarse varias fibras tan juntas como se necesite, además de tener una anchura mucho menor (de 1 mm en caso del montaje propuesto). Por otro lado, la técnica WDM permite transportar varias señales ópticas sobre una única fibra, lo que reduce el número de fibras necesarias.

3. Aumento en la seguridad de la instalación, eliminando cables de alta tensión sustituyéndolos por fibras por las que viajan señales ópticas

Mientras que la manipulación de cables que transportan señales eléctricas puede conllevar riesgos en caso de emplear altas tensiones, las fibras eliminan por completo este problema.

6. Estado del Arte

El objetivo de este apartado es presentar los conocimientos actuales sobre redes WDM, a través de trabajos previos que aborden temas relacionados con este tipo de sistemas ópticos. También se va a estudiar el tipo de herramientas que se emplean para las diferentes etapas de dichas redes: fuentes de luz, multiplexores y demultiplexores y filtros.

Por otro lado, se van a explicar los principios de esta técnica de multiplexación y las propiedades más relevantes de las POF para justificar su empleo en el proyecto.

6.1. Multiplexación por División en Longitud de Onda

La Multiplexación por División en Longitud de Onda, más conocida como WDM por sus siglas en inglés (Wavelength Division Multiplexing), es una técnica que permite transmitir por una única fibra óptica dos o más señales con diferente longitud de onda. Es una manera de optimizar el rendimiento de la fibra óptica ya que permite enviar información que proviene de diferentes fuentes utilizando una sola fibra. Es posible incluso establecer comunicaciones bidireccionales sobre una única fibra empleando esta técnica.

En un esquema WDM, la luz originada en cada fuente se modula con una señal diferente y se acopla a la entrada de una fibra. Es necesario un multiplexor capaz de tomar todas esas señales, que provienen de fuentes diferentes y por tanto de fibras diferentes, dando lugar a un haz policromático que se acopla en una única fibra. En el otro extremo de esta fibra se coloca un demultiplexor que hace la labor inversa: divide en haces monocromáticos la señal originada en el multiplexor y acopla cada uno a una fibra diferente. En muchas ocasiones, esta segunda etapa se debe completar con un filtrado ya que es posible que el demultiplexor, no separe correctamente cada portadora óptica o que simplemente divida el haz policromático en tantas ramas como sea necesario sin hacer esa disgregación. En la Figura 2 se ilustra el funcionamiento básico de la técnica WDM con cuatro señales.

Cuando un haz de luz se propaga por una fibra sufre dos tipos de dispersión (modal y cromática) que provocan su deformación, normalmente en forma de ensanchamiento. Este efecto hace que la anchura espectral de la fuente tenga gran importancia en redes WDM: cuanto más estrecho sea, en términos de longitud de onda, el haz de luz que emite una fuente menos probable es que se solapen dos señales con longitudes de onda

contiguas. Dicho solapamiento puede dificultar el proceso de filtrado en recepción para obtener cada señal por separado

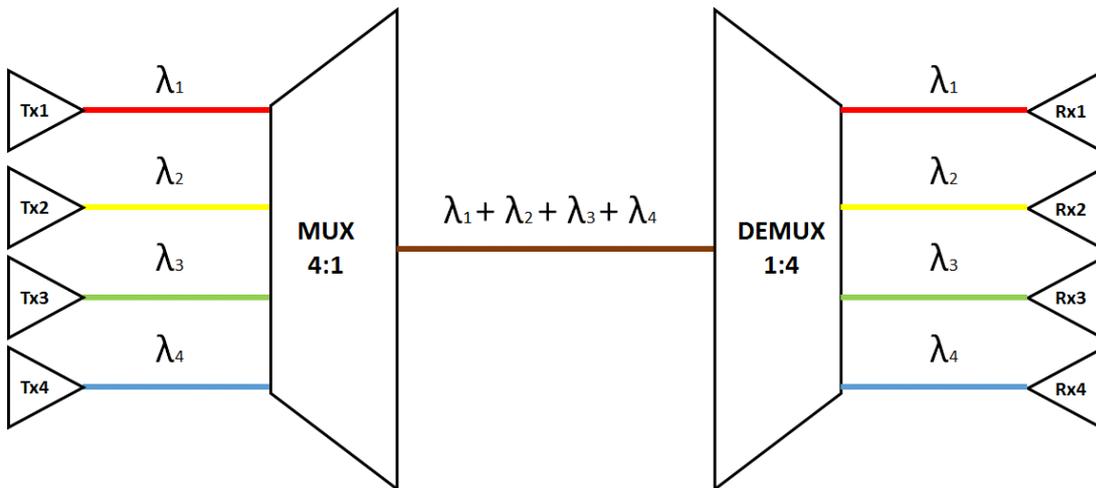


Figura 2: Esquema básico WDM con 4 señales

Con respecto a lo anterior, existen dos tipos de multiplexación por división de longitud de onda dependiendo de la separación en frecuencia de cada fuente: D-WDM (Dense-WDM) y C-WDM (Coarse WDM). La primera emplea longitudes de onda muy juntas, alrededor de 1 nm de separación entre dos diferentes. La segunda utiliza longitudes de onda más separadas por lo que el espectro se divide en partes más grandes. Esto implica una mayor tolerancia a la hora de elegir las fuentes y los filtros empleados en los sistemas C-WDM, abaratando por tanto su coste. En D-WDM, sin embargo, se exige una menor anchura espectral de las fuentes por lo que se puede concluir que es una aplicación en la que exclusivamente se pueden emplear láseres como fuente.

6.2. Fibra Óptica de Plástico

Las fibras ópticas de plástico o POF son fibras ópticas compuestas por materiales dieléctricos casi transparentes, normalmente de plástico. Esta composición permite que las POF sean más flexibles (es decir, puedan doblarse con un radio de curvatura menor) y de menor coste que las fibras de cristal, pero también que tengan una mayor atenuación. En este aspecto las fibras de cristal ofrecen una atenuación menor que 0,5 dB/km en el espectro infrarrojo, mientras que las POF sólo tienen una atenuación admisible entre 350 y 750 nm (coincidiendo con el espectro visible) con el valor mínimo aproximadamente en 570 nm [3]. Aun así, la atenuación en el espectro visible ronda los 100 dB/km por lo que las POF no se utilizan en transmisiones que superen los 100 metros de longitud.

Debido a sus propiedades, principalmente a su rango de menor atenuación, las frecuencias de las fuentes empleadas para transmitirse en este tipo de fibras son las comprendidas en el espectro visible y el infrarrojo cercano [2]. En la Figura 3 extraída de un documento de Toray se muestra la atenuación de las POF en estas frecuencias.

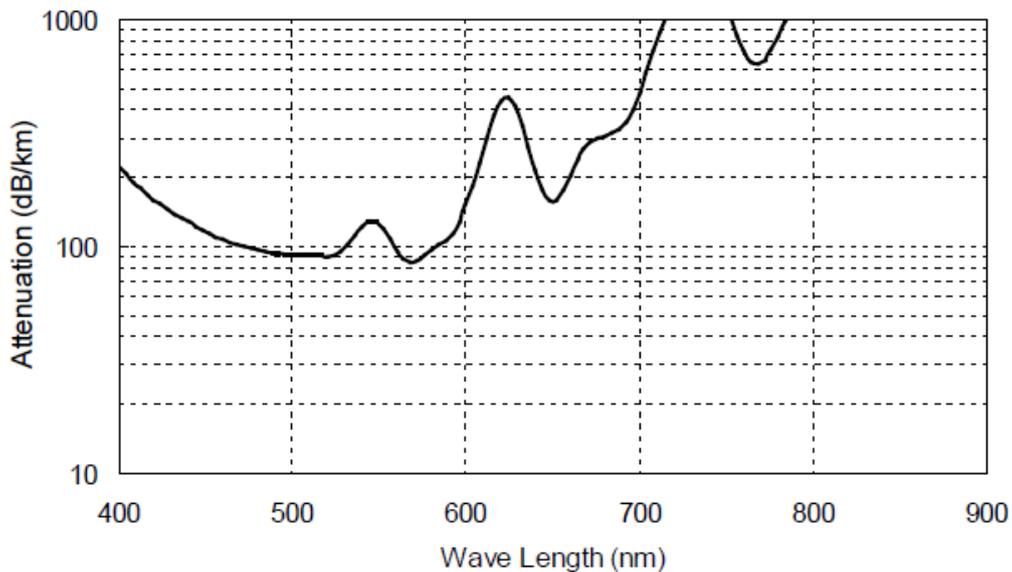


Figura 3: Atenuación de las POF en longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano

Entre las aplicaciones más destacadas de las POF se encuentran [3]: comunicaciones de corto alcance en entornos industriales o domésticos, comunicaciones en el interior de vehículos o aviones, construcción de sensores e inclusión en dispositivos médicos.

6.3. Filtros

Cuando el haz de luz que contiene señales de todas las longitudes de onda se demultiplexa, es separado en tantas fibras como fuentes tenga el sistema. Sin embargo, puede ser que el demultiplexor separe cada una de las portadoras en un haz monocromático o que simplemente divida la señal. En el segundo caso, el haz que viaja por cada una de ellas sigue siendo una parte de dicha mezcla pero con menor potencia. Por ello, en muchas ocasiones es necesario colocar un filtro en cada una de las fibras para seleccionar una de las señales correspondiente a una única fuente. Existen diferentes alternativas para el filtrado, siendo la más sencilla y la de menor coste el empleo de láminas de colores.

Este tipo de láminas han sido confirmadas en un estudio anterior [4] como válidas para permitir el paso de un rango de longitudes de onda determinado, bloqueando el resto. Sin embargo, este mismo estudio aclara que su rendimiento es desigual para diferentes

colores: aquellos filtros con gran coeficiente de transmisión para el rango deseado pueden permitir también el paso de algunas longitudes de onda no deseadas, mientras que los que rechazan con gran efectividad las señales no deseadas tienen coeficientes de transmisión bajos para las de interés.

Por tanto, a la hora de seleccionar un filtro se debe tener en cuenta la curva de transmisión por longitud de onda que proporciona el fabricante para cada filtro. Para cada fuente concreta siempre interesa tener la máxima transmisión para su rango de longitudes de onda y la mínima posible para el resto. En la Figura 4 se muestra la curva de un filtro de cristal de Thorlabs. A pesar de que su banda de transmisión principal no se encuentra en el espectro visible, se ha escogido esta imagen por su similitud con una situación ideal donde se tiene una capacidad de transmisión para un rango concreto y un bloqueo casi completo para el resto.

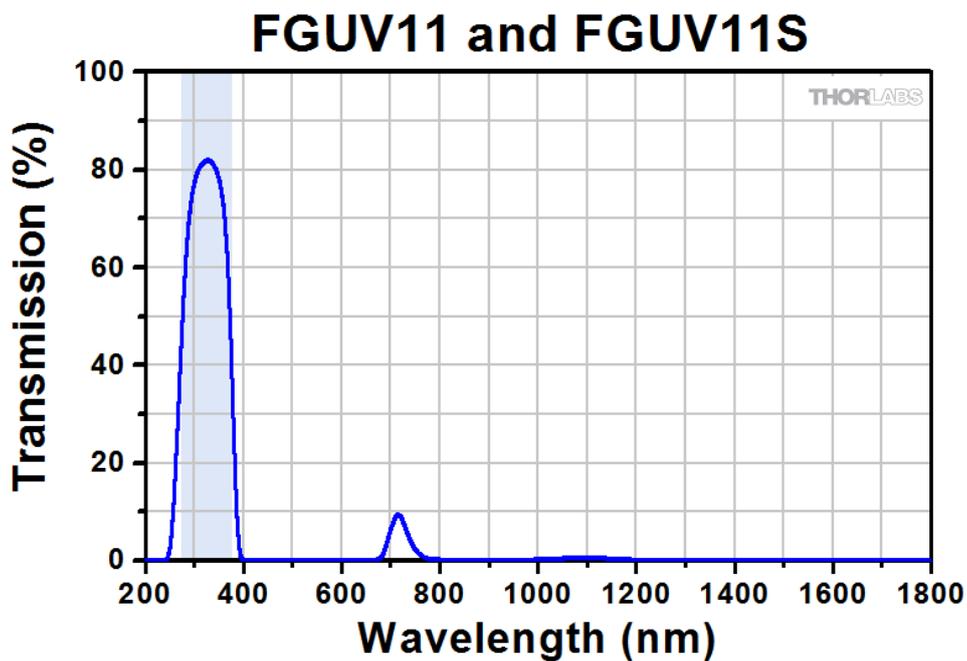


Figura 4: Curva de transmisión para el filtro FGUV11S de Thorlabs

Como alternativa de menor coste a los filtros de cristal, en [5] se emplean como filtro láminas semitransparentes de colores con diferentes bandas de transmisión. Eligiendo el filtro adecuado en cada caso se ha conseguido un resultado satisfactorio en cuanto a la reducción de crosstalk en el receptor. A pesar de su simplicidad y bajo coste, ofrecen una alta tasa de transmisión para un fragmento determinado del espectro visible y un alto rechazo al resto de longitudes de onda. Como contraparte, está la baja selectividad de la banda de filtrado, es decir, puede abarcar un intervalo demasiado grande de longitudes de onda y/o permitir el paso de otras señales además de la principal.

6.4. Estudios anteriores de redes WDM sobre POF

Este apartado está dedicado a describir trabajos anteriores sobre sistemas ópticos que emplean WDM, así como los elementos utilizados para multiplexar y demultiplexar las diferentes señales.

En [6] se propone un módulo WDM que emplea 4 LED con longitudes de onda diferentes sobre una fibra POF de salto de índice y un demultiplexor basado en una rejilla de difracción plana. Los resultados obtenidos en cuanto a velocidades máximas de envío, poniendo como condición un BER menor a 10^{-3} fueron 3700 Mbps y 1145Mbps para longitudes de fibra de 1 y 30 m respectivamente. Una característica llamativa del montaje empleado en este caso es que dos de los LED emisores tienen sus espectros de emisión centrados en longitudes de onda muy cercanas (410 y 440 nm). Todos los espectros de las fuentes que fueron empleadas pueden observarse en la Figura 5. Como consecuencia de la dispersión provocada por la fibra y el consiguiente ensanchamiento de los pulsos, podría darse una mayor tasa de error en caso de no emplear el demultiplexor y los filtros adecuados. Por tanto, es de vital importancia conocer las características de los componentes empleados en el montaje propuesto en este proyecto; así como el efecto de la fibra, la multiplexación/demultiplexación y los filtros.

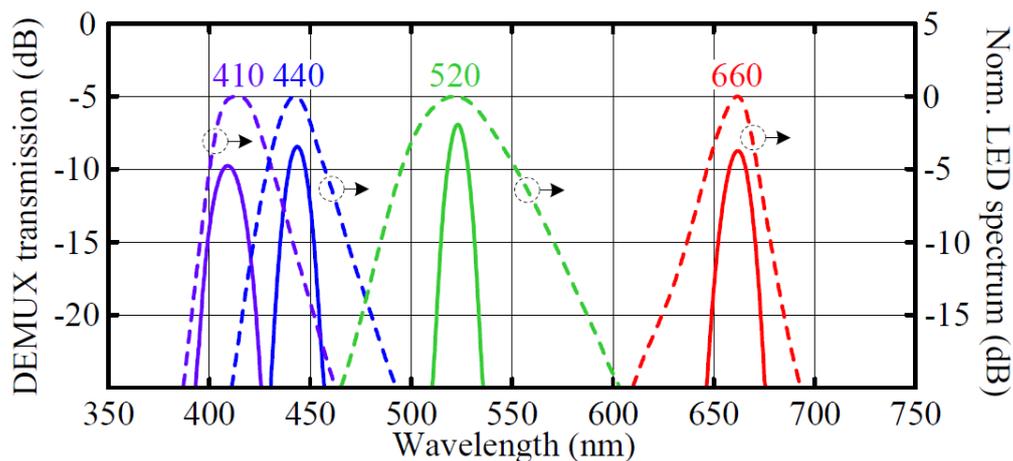


Figura 5: Espectro de emisión y demultiplexación de 4 canales LED

Un trabajo similar se propone en [7] con una capacidad de envío mucho mayor, debido al empleo de diodos láser en vez de LEDs. En este artículo se muestra un montaje con 6 canales (todos ellos en el espectro visible) multiplexados mediante un acoplador y demultiplexados mediante una rejilla de difracción plana. El tipo de fibra empleado es una POF de Salto de Índice de 1 mm de diámetro. Con ese esquema se consigue llevar a cabo una transmisión de 21,4 Gbps.

En [5] se propone un esquema WDM sobre POF similar al anterior, en este caso con 3 canales (LEDs en 650nm, 470 nm y 520 nm) y multiplexores de fabricación propia (realmente acopladores 3:1) a partir de una fibra POF PMMA. Como demultiplexor se utiliza un elemento similar al multiplexor y unos filtros fabricados con láminas de plástico de colores colocados antes de cada receptor. Para analizar la validez del esquema, se introdujeron al sistema dos señales provenientes de dos cámaras y una de un DVD (multiplexadas en una única POF) para después visualizarlas en tres monitores. Los resultados obtenidos mostraron unas pérdidas de inserción en los acopladores para multiplexación/demultiplexación de 6.4 dB para la fuente de 650nm, 7.5 para la de 470 nm y 5.9 para la de 520 nm, y una longitud máxima del sistema de 25 metros. Este estudio propone un esquema muy similar al que se presenta en este documento, ya que emplea acopladores para multiplexar y demultiplexar señales y relega el filtrado de señales no deseadas en filtros de plástico. La novedad que se pretende incluir es añadir una nueva fuente de luz, situada en el infrarrojo cercano, que otorgue un nuevo canal de transmisión al sistema.

En [8] se presenta un multiplexor/demultiplexor consistente en una rejilla de difracción y una lente de forma esférica para una transmisión de 5 canales sobre una fibra SI-POF. Con un tamaño reducido de de aprox. 55 x 65mm presenta unas pérdidas de inserción entre 2,9 y 4 dB inferiores a las del caso anterior. En este caso, el demultiplexor es capaz de separar en diferentes haces monocromáticos la señal policromática de su entrada, con un ancho de banda de filtrado a -3 dB mayor que 30nm. En la Figura 6 se muestra la función de transferencia de los MUX/DEMUX empleados en este experimento. Empleando estos elementos, se dice que es posible emplear 8 canales diferentes manteniendo las pérdidas por inserción de los MUX/DEMUX por debajo de los 4,5 dB y ancho de banda de filtrado a -25 dB de 12 hasta 21 nm. A pesar de estas mejores prestaciones, su fabricación es más costosa y de mayor complejidad que la del multiplexador anterior.

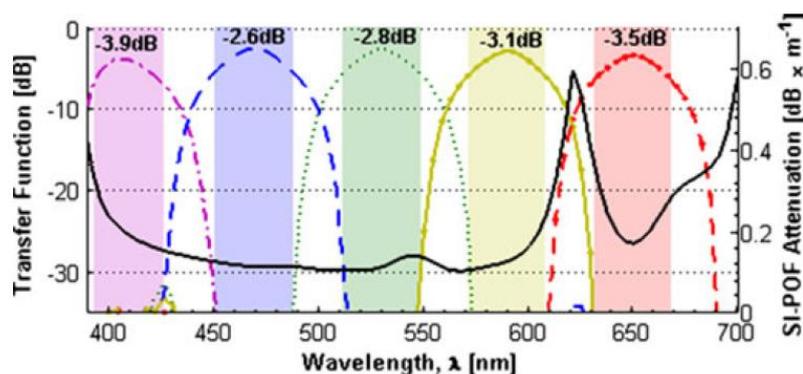


Figura 6: Función de transferencia de un multiplexor/demultiplexor de 5 canales

Una configuración muy similar a lo que se pretende en el presente proyecto aparece en [9], donde se desarrolla un enlace WDM bidireccional sobre POF. Este estudio emplea dos fuentes LEDs de diferentes longitudes de onda (470 nm y 650 nm), una para cada dirección, y filtros de colores de bajo coste. Para bloquear las señales interferentes en cada caso se aplicaron tres capas de estos filtros, obteniéndose una reducción de 25.5 dB para la luz azul con un filtro rojo y de 44.9 dB para la roja con un filtro azul, en este caso con dos capas. Aunque en el caso que se presenta no se busca un enlace bidireccional, el tipo de filtrado puede servir de referencia debido a que se obtiene un rechazo a la señal interferente de más de 25 dB.

En [4] se prueba una vez más la validez de los filtro de lámina para filtrar longitudes de onda en una red WDM sobre POF. El empleo de este tipo de materiales está enfocado a la reducción del coste de la construcción de los sistemas ópticos. Igual que en el presente proyecto, en primer lugar se eligieron una serie de filtros atendiendo a su curva de distribución de energía en el espectro. A continuación, se caracterizó el rendimiento de cada uno midiendo sus pérdidas de inserción para el rango óptico de interés y el rechazo al resto de longitudes de onda. Los resultados de este análisis mostraron que la mayoría de los filtros no bloquean lo suficiente a las longitudes de onda no deseadas, y los que lo hacen introducen pérdidas para las señales de interés. Aun así, existen una serie de filtros que realizan correctamente el filtrado sin degradar la señal en exceso, por lo que las láminas de colores son una alternativa a tener en cuenta en el filtrado de sistemas WDM.

7. Análisis de Alternativas

En el montaje del sistema óptico propuesto se han estudiado diferentes alternativas para los componentes empleados; como fuentes de luz, fotodetectores o filtros. El objetivo de este apartado es describir las propiedades de cada alternativa, para posteriormente seleccionar la combinación óptima de componentes.

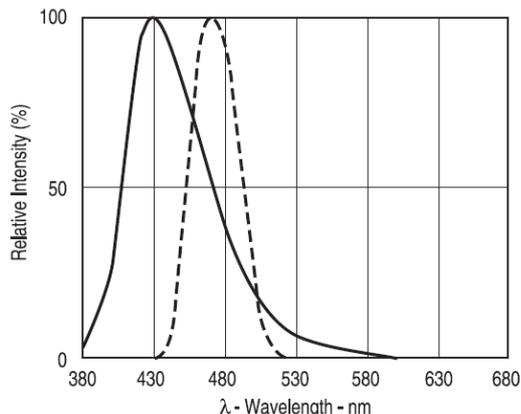
7.1. Fuentes de Luz

En un sistema óptico de la características requeridas en la solución propuesta, es posible emplear dos tipos de fuentes de luz: diodos láser y LED. Los diodos láser ofrecen luz polarizada y coherente y una anchura espectral pequeña entre 1 y 6 nm aproximadamente. Los LED, por el contrario, tienen una gran anchura espectral que oscila aproximadamente entre 20 y 50 nm, lo que se traduce en un peor acoplamiento de la luz en fibras monomodo.

Las mejores prestaciones de los diodos láser hacen que su precio sea superior al de los LED. En el presente proyecto no es crítica la anchura espectral, ya que el empleo de tres o cuatro señales en espectro visible (o infrarrojo cercano) no precisa una gran separación entre la longitud de onda de sus espectros de emisión. Por ello, se ha elegido trabajar con LED por su menor precio.

Concretamente, los LED elegidos como fuentes de luz para el sistema óptico propuesto son del fabricante Industrial Fiberoptics, modelos IF-E92B, IF-E93, IF-E97 e IF-E91D . A continuación se muestran sus especificaciones y sus espectros de emisión, extraídos de sus respectivos datasheet.

LED IF-E92B (Azul)

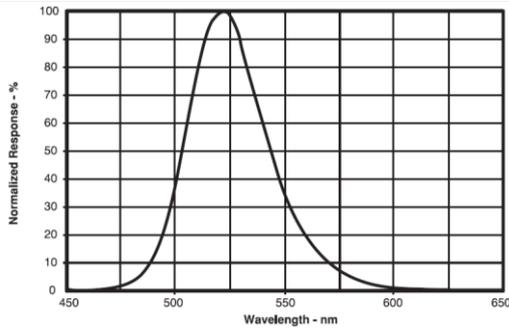


| Parameter Typical Values, 25° C, | Symbol | IF-E92A | IF-E92B | Unit |
|---|------------------|------------|-----------|----------------|
| Peak Wavelength | λ_{PEAK} | 430 | 470 | nm |
| Spectral Bandwidth (FWHM) | $\Delta\lambda$ | 80 | 30 | nm |
| Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber ≤ 0.1 mm, 100 mm polished fiber, $I_F=10$ mA | P_O | 80 -11 | 400 -4 | μ W dBm |
| Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) (Figure 3) | t_r t_f | 600 500 | 35 150 | ns ns |
| Capacitance ($V_F=0$, $F=1$ Mhz) | C_0 | 75 | 55 | pF |
| Forward Voltage (10 MA) | V_F | 3.7 | 3.0 | V |
| Temperature Coefficient, λ_{PEAK} | $TC\lambda$ | .16 | .16 | nm/K |

Figura 7: Espectros de emisión y especificaciones de los LED IF-E92A (continua) e IF-92B (discontinua)

Nota: el LED escogido entre las dos opciones anteriores es el IF-E92B porque, a pesar de tener un centro de emisión más cercano al verde (470nm frente a los 430 nm del IF-E92A), ofrece mejores prestaciones: mayor potencia acoplada a la fibra, menor tiempo de subida y menor anchura espectral.

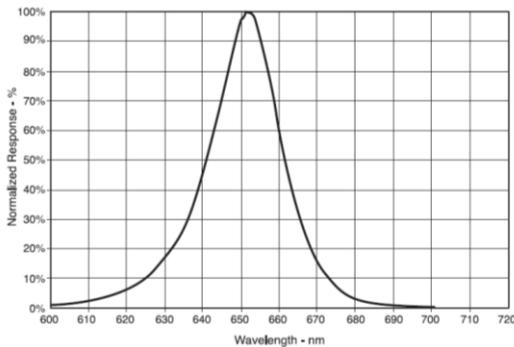
LED IF-E93 (Verde)



| Parameter | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Peak Wavelength | λ_{PEAK} | - | 522 | - | nm |
| Spectral Bandwidth (FWHM) | $\Delta\lambda$ | - | 40 | - | nm |
| Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber ≤ 0.1 mm, 1 m SH4001 fiber, $I_F=20$ mA | P_o | 600 -2.2 | 790 -1.0 | 950 -0.2 | μ W dBm |
| Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) (F=1 MHz) See Figure 3 | t_r, t_f | - | 145, 80 | - | ns |
| Capacitance (V _F =0, F=1 MHz) | C_0 | - | 65 | - | pF |
| Forward Voltage ($I_F=20$ mA) | V_f | - | 3.1 | - | V |

Figura 8: Espectro de emisión y especificaciones del LED IF-E93

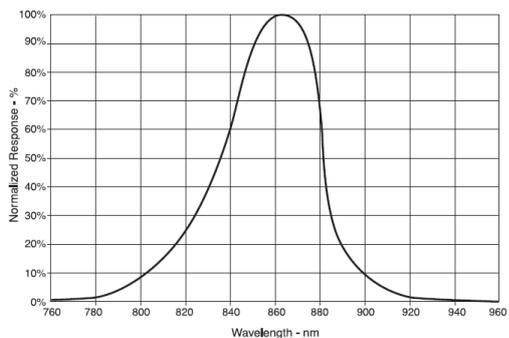
LED IF-E97 (Rojo)



| Parameter | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Peak Wavelength | λ_{PEAK} | 650 | 660 | 670 | nm |
| Full-Spectral Bandwidth (50% of I _{MAX}) | $\Delta\lambda$ | - | 40 | - | nm |
| Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber ≤ 0.1 mm, 1 m polished fiber, $I_F=20$ mA | Φ_{min} | 250 -6.0 | 325 -4.9 | 425 -3.7 | μ W dBm |
| Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($I_F=20$ mA) | t_r, t_f | - | .5 | - | μ s |
| Capacitance (F=1 MHz) | C_0 | - | 30 | - | pF |
| Forward Voltage ($I_F=20$ mA) | V_f | 1.7 | 1.9 | 2.1 | V |

Figura 9: Espectro de emisión y especificaciones del LED IF-E97

LED IF-E91 (Infrarrojo)



| Parameter | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Peak Wavelength | λ_{PEAK} | 860 | 870 | 875 | nm |
| Spectral Bandwidth (FWHM) | $\Delta\lambda$ | - | 50 | - | nm |
| Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber ≤ 0.1 mm, 100 mm SH4001 polished fiber, $I_F=20$ mA | P_o | 280 -5.5 | 420 -3.8 | 560 -2.5 | μ W dBm |
| Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) (Figure 3) | t_r, t_f | - | 3.0 | - | ns |
| Capacitance ($I_F=1$ MHz) | C_0 | - | 60 | - | pF |
| Forward Voltage ($I_F=20$ mA) | V_f | - | 1.38 | 1.58 | V |
| Temperature Coefficient, λ_{PEAK} | TC_{λ} | - | 0.3 | - | nm/K |

Figura 10: Espectro de emisión y especificaciones del LED IF-E91D

Además de sus especificaciones eléctricas y ópticas, cabe destacar que estos LED precisan de un circuito controlador al que introducir las señales de alimentación y modulación. Se tratan de circuitos sencillos y muy similares entre sí, que difieren únicamente en los valores de las resistencias empleadas. En la Figura 11 se muestra el circuito controlador del LED IF-E93.

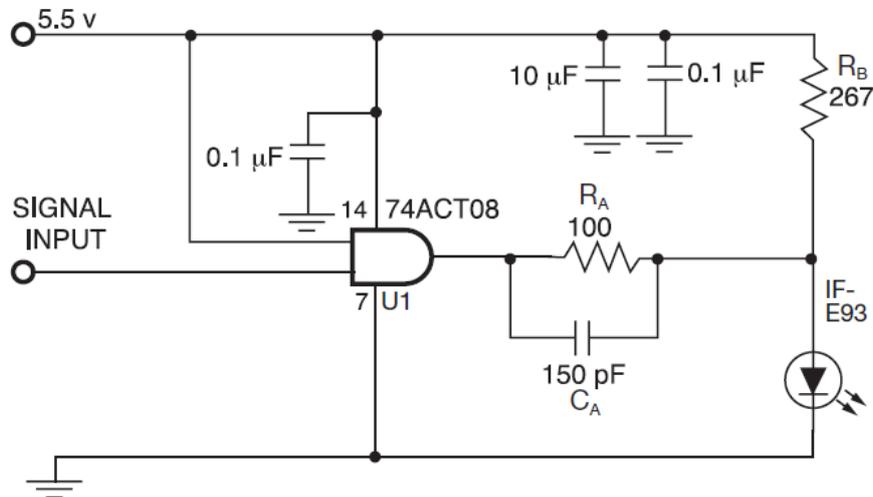


Figura 11: Circuito controlador del LED IF-E93

Otra propiedad ventajosa de esta serie de fuentes LED es que están adaptados para adaptarse a una POF de 1 mm de diámetro de manera muy sencilla, enroscando su salida a la propia fibra.

7.2. Fotodetectores

Los fotodetectores son dispositivos optoelectrónicos que reciben una señal óptica y la convierte en una señal eléctrica, en la solución propuesta se van a emplear en la etapa de recepción. Se plantean dos tipos de fotodetectores diferentes: el modelo PDA100A-EC de Thorlabs o emplear otros más sencillos de la misma empresa que los LED, Industrial Fiberoptics.

Fotodetector PDA100A-EC

Se trata de un fotodetector de silicio con ganancia ajustable y un rango de detección de longitudes de onda entre 320 y 1100 nm. Abarca por tanto el rango visible e infrarrojo cercano en el que emiten las fuentes de luz seleccionadas. Cuenta con una salida BNC, por lo que resulta sencillo conectarla directamente a un osciloscopio para observar la señal convertida. En la Figura 12 se muestra la curva de responsividad de este dispositivo para su rango de longitudes de onda.

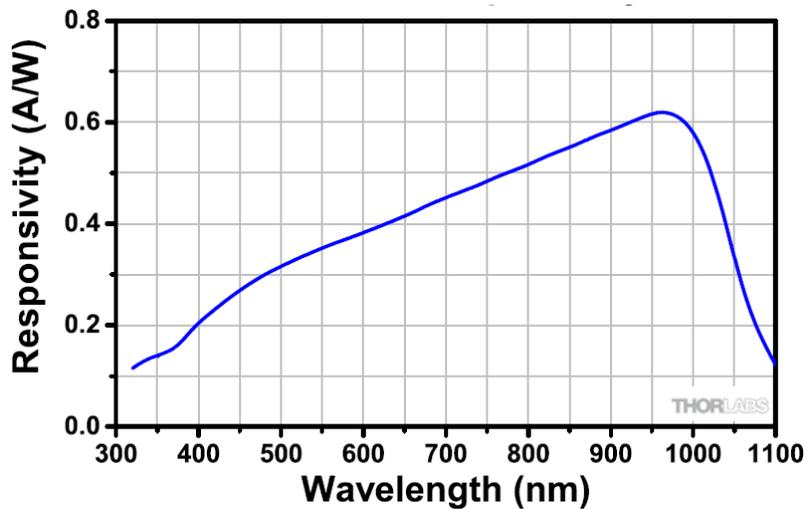
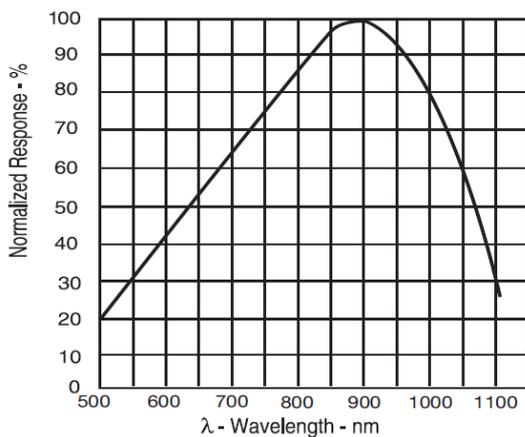


Figura 12: Responsividad respecto a la longitud de onda del fotodetector PDA100-EC de Thorlabs

Fotodetectores de Industrial Fiberoptics

Se trata de una serie de fotodetectores del mismo fabricante de los LED seleccionados y, por tanto, especialmente diseñados para trabajar con POF de 1 mm de diámetro. Se trata de una solución económica que al igual que los LED necesita de un circuito, en este caso de trasimpedancia. Dentro de esta gama se encuentran dos alternativas diferentes, las cuales se van a describir a continuación.

Fotodetector IF-D91

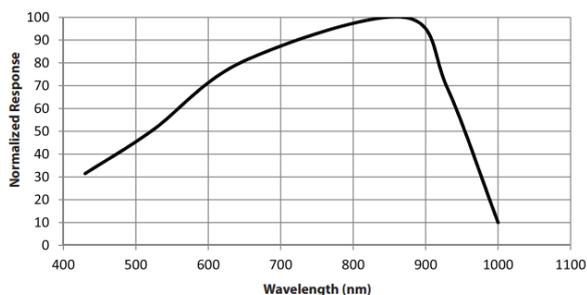


| Parameter | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---|------------------|------|------------|------|---------------|
| Wavelength for Maximum Photosensitivity | λ_{PEAK} | - | 880 | - | nm |
| Spectral Bandwidth (R=10% of RMAX) | $\Delta\lambda$ | 450 | - | 1050 | nm |
| Rise and Fall Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($R_L=50 \Omega$, $V_R=20V$, $\lambda=850$ nm) | t_r, t_f | - | 15 | - | ns |
| Total Capacitance ($P_{IN}=0$, $f=1.0$ MHz) $V_R=20$ V $V_R=0$ V | C C_o | - | 2 6 | - | pF |
| Responsivity min. @ 870 nm @ 650 nm | R | - | 0.5 0.4 | - | $\mu A/\mu W$ |
| Reverse Dark Current ($V_R=30$ volts, $P_{IN}=0$) | I_D | - | 1 | 60 | nA |
| Reverse Breakdown Voltage | $V_{(BR)R}$ | 40 | - | - | V |
| Forward Voltage | V_f | - | 0.8 | - | V |

Figura 13: Responsividad y especificaciones del fotodetector IF-E91D

En la Figura 13 se muestran la curva de responsividad en función de la longitud de onda además de algunas especificaciones. Dicha curva ofrece valores normalizados, se debe tener en cuenta que el valor máximo en torno a los 900nm es de 0,5 W/A .El fabricante indica un rango de longitudes de onda de 450 a 1100 nm, un ancho de banda de 25 MHz y una velocidad de hasta 30 Mbps.

Fotodetector IF-D92



| Parameter | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---|---------------------|------|------------|------|---------------------------|
| Wavelength for Maximum Photosensitivity | λ_{PEAK} | - | 870 | - | nm |
| Spectral Bandwidth (R=10% of RMAX) | $\Delta\lambda$ | 400 | - | 1100 | nm |
| Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($R_L=1\text{ k}\Omega$, $I_C=1.0\text{ mA}$, $V_{CE}=5\text{ V}$, $\lambda=850\text{ nm}$) | t_r t_f | - | 25 25 | - | μs |
| Responsivity min. @ 870 nm @ 650 nm | R | - | 450 350 | - | $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ |
| Collector Dark Current ($V_{CE}=10\text{ volts}$) | I_{CEO} | - | - | 100 | nA |
| Breakdown Voltage ($I_C=100\text{ }\mu\text{A}$) | BV_{CEO} | 30 | - | - | V |
| Breakdown Voltage ($I_C=-100\text{ }\mu\text{A}$) | BV_{ECO} | 5 | - | - | V |
| Saturation Voltage ($I_C=250\text{ }\mu\text{A}$, $P_m=100\text{ }\mu\text{W}$) | $V_{CE\text{ sat}}$ | - | 0.15 | - | V |

Figura 14: Responsividad y especificaciones del fotodetector IF-E92D

En la Figura 14 se muestran la curva de responsividad y las especificaciones del fotodetector en cuestión. Este modelo opera en un rango de longitudes de onda idéntico al anterior (entre 450 y 1100 nm) pero con unos valores de responsividad mucho mayores, el máximo se sitúa en 870nm con un valor de 450 W/A. No obstante, soporta velocidades del orden de 20 kbps y anchos de banda de 15 kHz.

A la hora de tomar la decisión sobre el fotodetector empleado, el ancho de banda es un factor limitante y debe ser superior a 20 kHz. Por eso, aunque el modelo IF-D92 tenga una responsividad 900 veces superior al IF-D91, se prefiere este segundo por su mayor ancho de banda. Aunque la corriente de salida sea inferior, es posible amplificarla con circuitos externos.

7.3. Filtros

El demultiplexor empleado en el sistema óptico no realiza un filtrado por longitudes de onda, por lo que es necesario colocar un filtro en cada rama de recepción que permita el paso del rango de longitudes de onda de un LED determinado y bloquee el resto. Con este fin se presentan dos opciones diferentes: unos filtros de lámina semitransparentes del fabricante Rosco y otros de cristal de boroscilato con tratamiento por capas de Andover Corporation.

7.3.1. Filtros Rosco

Concretamente, los filtros de lámina escogidos son de la gama e-colour y están fabricados con procesos de formulación de tintes y adhesivos. Existe una amplia gama de filtros con anchos de banda situados en diferentes regiones del espectro visible.

Son filtros de bajo coste (entre 10€ y 20 €) por lo que ofrecen ciertas limitaciones en cuanto a su conservación, además no es posible emplearlos conjuntamente con fuentes que emiten en el infrarrojo ya que no pueden eliminar señales de estas frecuencias fuera del espectro visible con ellos.

Para cada color se han preseleccionado aquellos filtros que presentan una curva de transmisión lo más parecida posible a lo ideal, que consiste en una transmisión alta para la longitud de onda central de emisión de un LED bloqueando completamente el resto. Con cada uno de ellos se ha hecho un estudio para determinar cuál es el más adecuado para cada caso. La preselección de filtros ha sido la que se muestra en la Tabla 1.

| Color | λ central (nm) | Referencias de los filtros | Figura |
|-------|------------------------|------------------------------|--------------------|
| Azul | 470 | #117, #118, #119, #120, #180 | Figura 15Figura 17 |
| Verde | 523 | #89, #90, #124, #139 | Figura 16 |
| Rojo | 650 | #19, #22, #24, #25, #106 | Figura 17 |

Tabla 1: Pre selección de filtros Rosco e-colour

Además de elegir una serie de filtros para cada LED de un rango determinado, se han incluido dos filtros amarillos cuyo espectro de transmisión abarca las longitudes de onda del verde y rojo. El objetivo de estos filtros es complementar a otros en caso de que no haya ningún filtro capaz de permitir el paso de una señal y bloquear satisfactoriamente el resto. Los filtros amarillos escogidos tienen las referencias #100 y #101 y se muestran en la Figura 18.

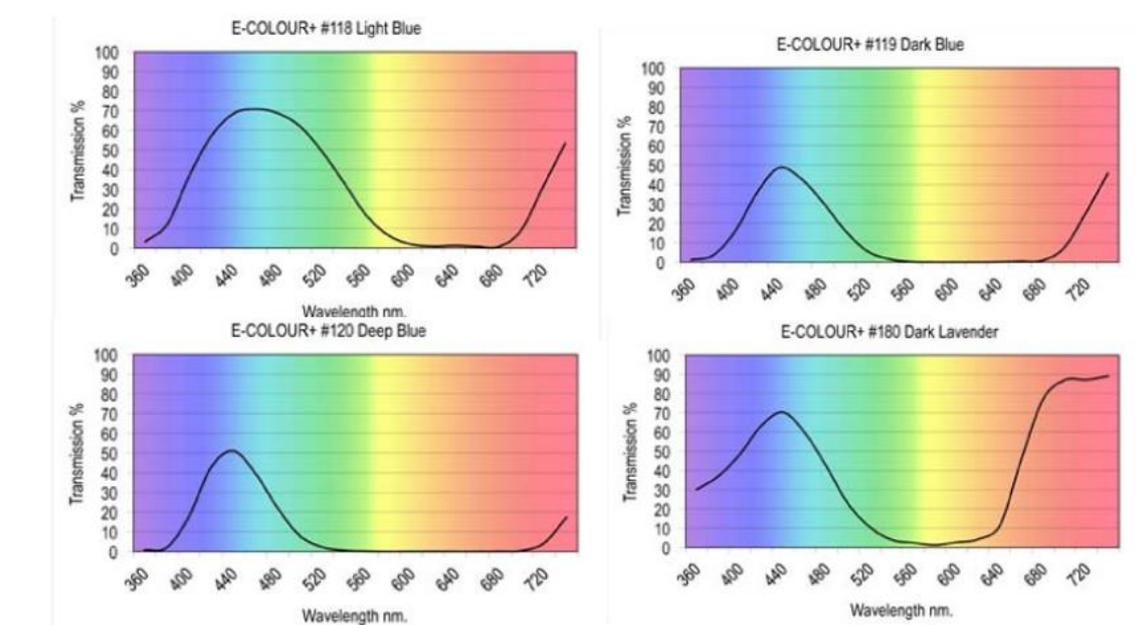


Figura 15: Filtros Azules Rosco e-colour

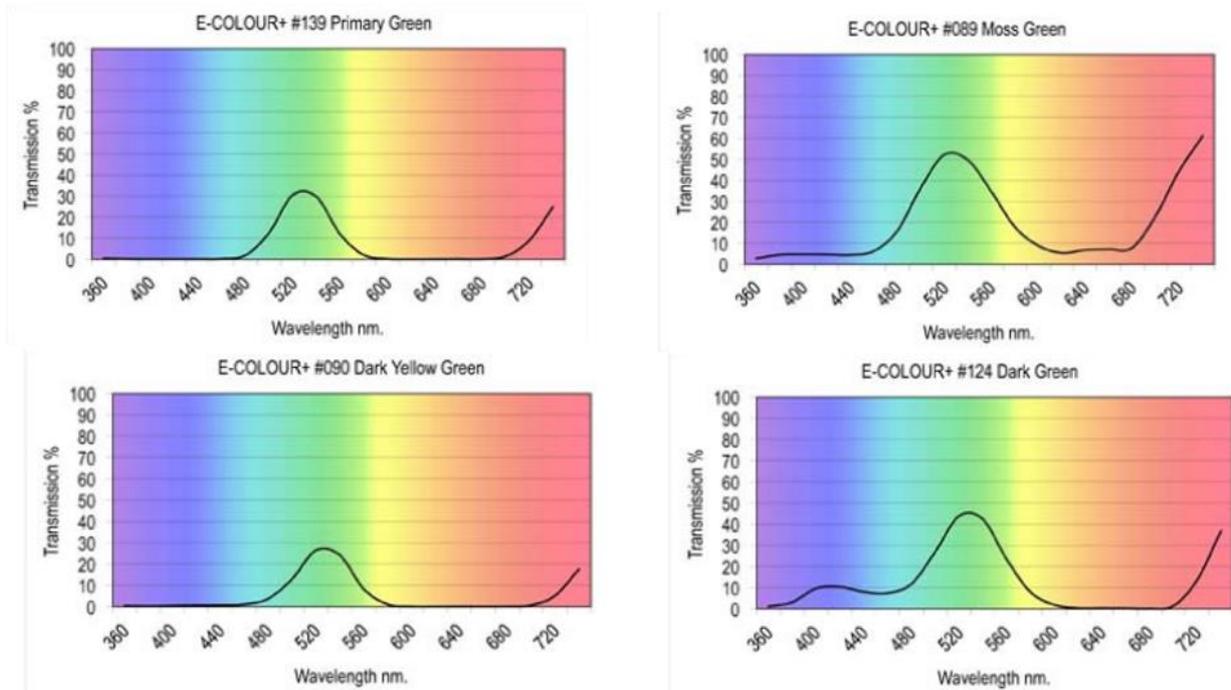


Figura 16: Filtros verdes Rosco e-colour

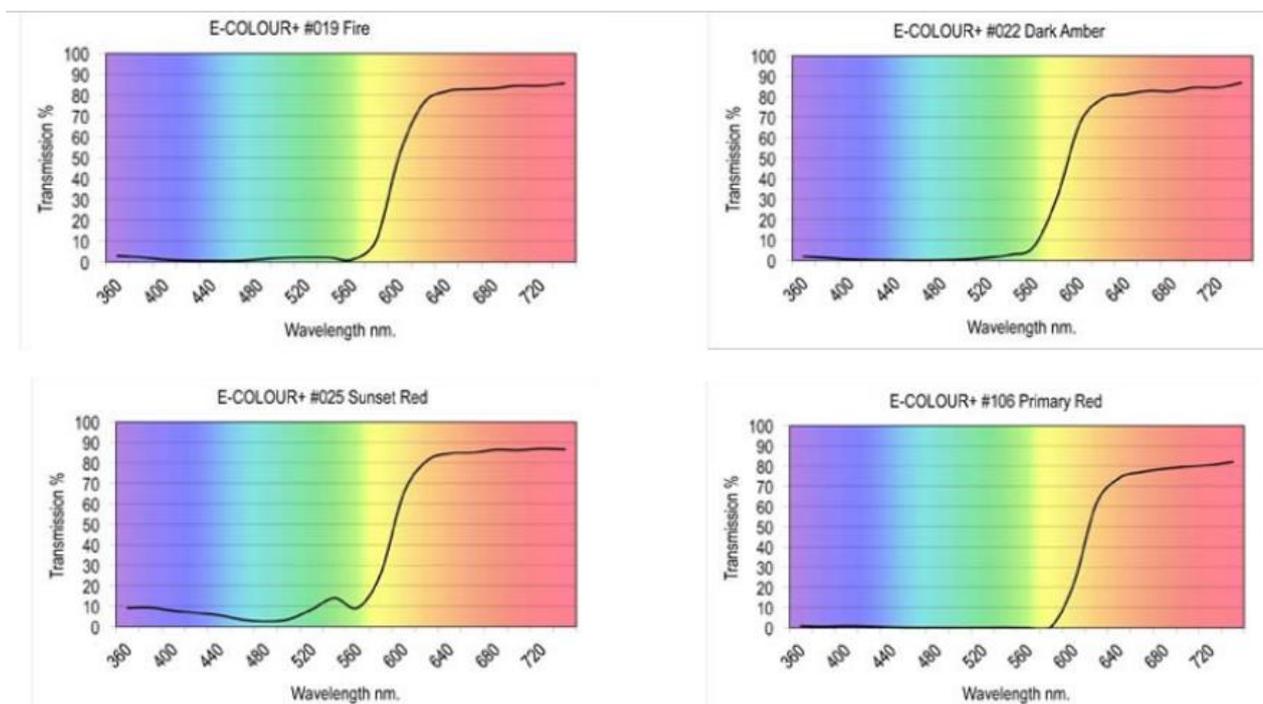


Figura 17: Filtros rojos Rosco e-colour

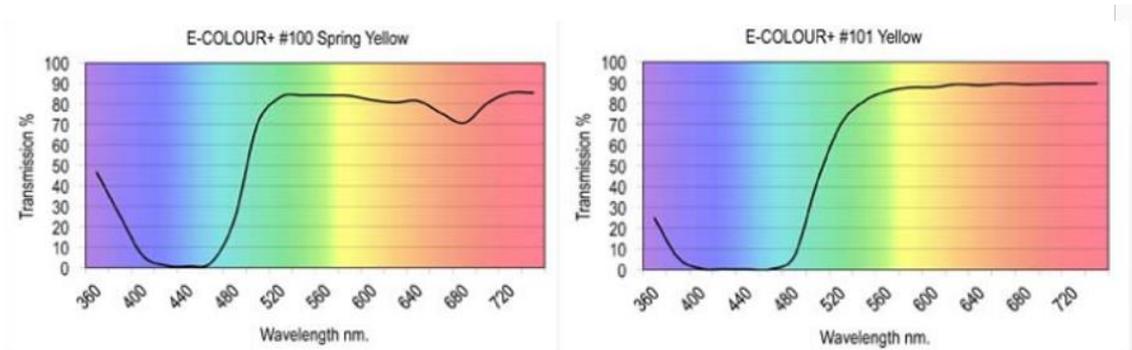


Figura 18: Filtros amarillos Rosco e-colour

Para seleccionar el filtro o combinación de filtros se han realizado una serie de medidas que se analizarán en el apartado 11. Como se puede observar en las figuras anteriores, el porcentaje de transmisión de cada filtro para su longitud de onda de interés es muy diferente. Para los filtros rojos (Figura 17) es cercana al 90% por ciento mientras que en los azules (Figura 15) y verdes (Figura 16) es mucho menor, oscilando en los rangos de 50% - 70% y 30%-55% respectivamente.

La manera de insertar este tipo de filtros en el sistema consiste en recortar un pequeño fragmento aproximadamente del tamaño de la fibra y colocarlo antes del fotodetector.

7.3.2. Filtros Andover Corporation

Se tratan de filtros de cristal sobre los que se han depositado diferentes capas con procedimientos complejos. Debido a su proceso de fabricación ofrecen una banda de paso muy selectiva, incluso de 10 nm, eliminando además completamente el resto de señales del espectro. Esta cualidad permite que este tipo de filtros sean compatibles con fuentes LED que emitan en el infrarrojo, ofreciendo la posibilidad de trabajar con la multiplexación de 4 fuentes diferentes. Estas características hacen que su precio sea mayor que el de los filtros de lámina, situándose en los 50 € aproximadamente dependiendo del tamaño solicitado.

A pesar de su mejor rendimiento en el filtrado, ofrecen un coeficiente de transmisión del rango de interés inferior al 60%, lo que supone una pérdida de potencia de casi 3 dB. Del mismo modo, el porcentaje de transmisión de la señal es muy similar en todos ellos, lo que permite una similitud en cuanto a las pérdidas que introduce para todos los LED.

Otra dificultad que presentan en el sistema óptico propuesto es su compatibilidad con los fotodetectores de Industrial Fiberoptics, ya que estos están preparados para operar con fibra de 1 mm. La solución requerida en este caso es utilizar un colimador que tome el haz de luz divergente proveniente de la fuente LED y lo convierta en uno paralelo para

que atraviese el filtro. Una vez realizado el filtrado, habría que revertir el proceso con otro dispositivo. La inserción de este tipo de dispositivos incrementaría la complejidad y el coste del diseño.

Los filtros escogidos tienen un diámetro de 12,5 mm, con lo que se adaptan perfectamente al fotodetector PDA100A-EC de Thorlabs. Se han escogido los modelos que mejor se adaptan al espectro de emisión de las fuentes empleadas. En la Tabla 2 se recogen las características más relevantes de cada filtro seleccionado, y sus curvas de transmisión en las figuras indicadas en cada caso.

| λ Fuente (nm) | Filtro | λ central (nm) | Anchura espectral (nm) | % Transmisión | Figura |
|-----------------------|---------|------------------------|------------------------|---------------|-----------|
| 470 | 470FS10 | 470 \pm 3 | 10 \pm 2 | 50 | Figura 19 |
| 523 | 523FS10 | 523 \pm 2 | 10 \pm 2 | 55 | Figura 20 |
| 650 | 650FS20 | 650 \pm 2 | 10 \pm 4 | 55 | Figura 21 |
| 870 | 870FS10 | 870 \pm 3 | 10 \pm 2 | 50 | Figura 22 |

Tabla 2: Propiedades de los filtros de Andover Corporation

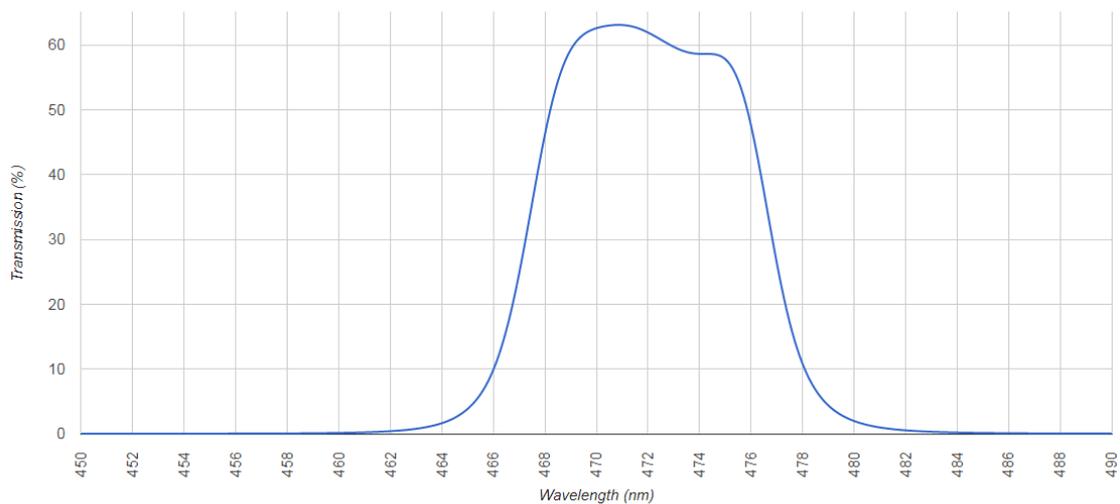


Figura 19: Curva de transmisión del filtro 470FS10

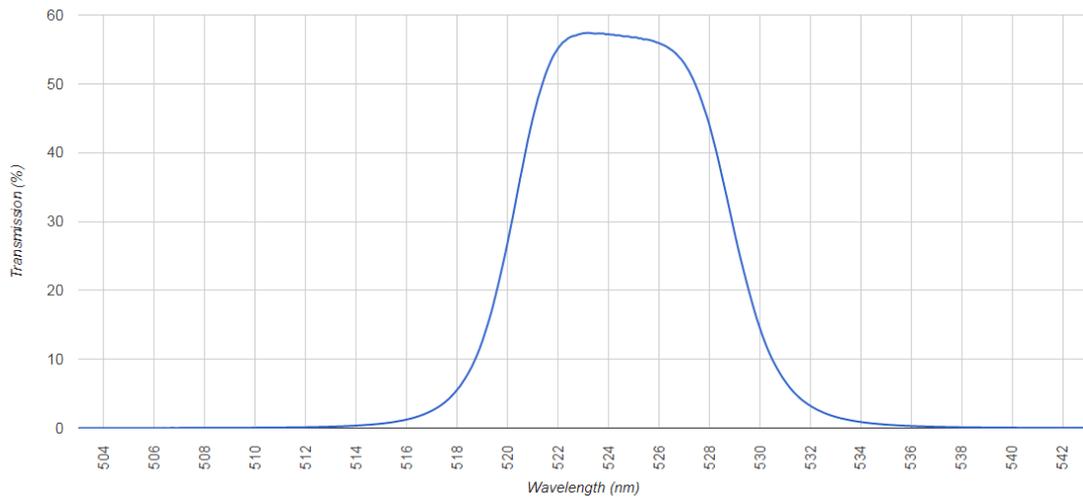


Figura 20: Curva de transmisión del filtro 523FS10

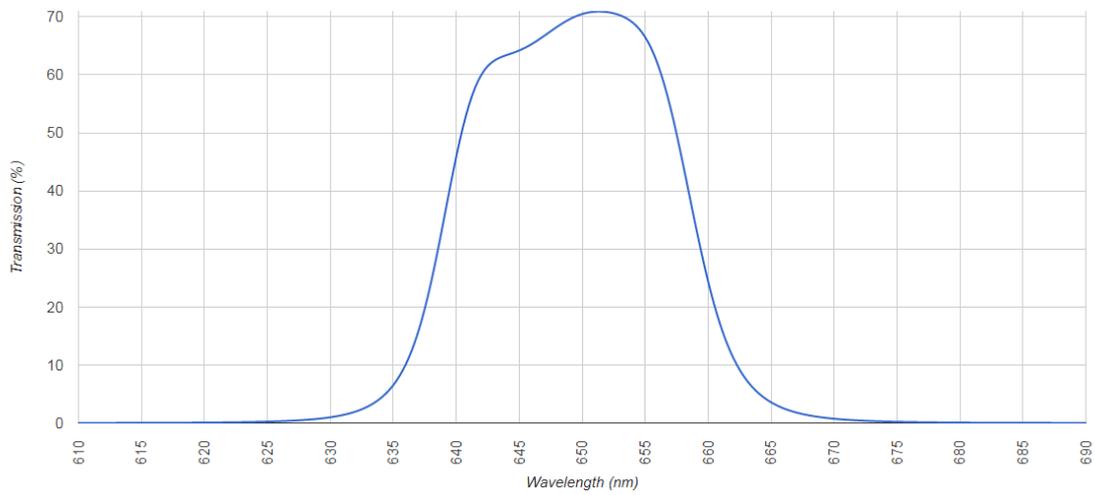


Figura 21: Curva de transmisión del filtro 650FS20

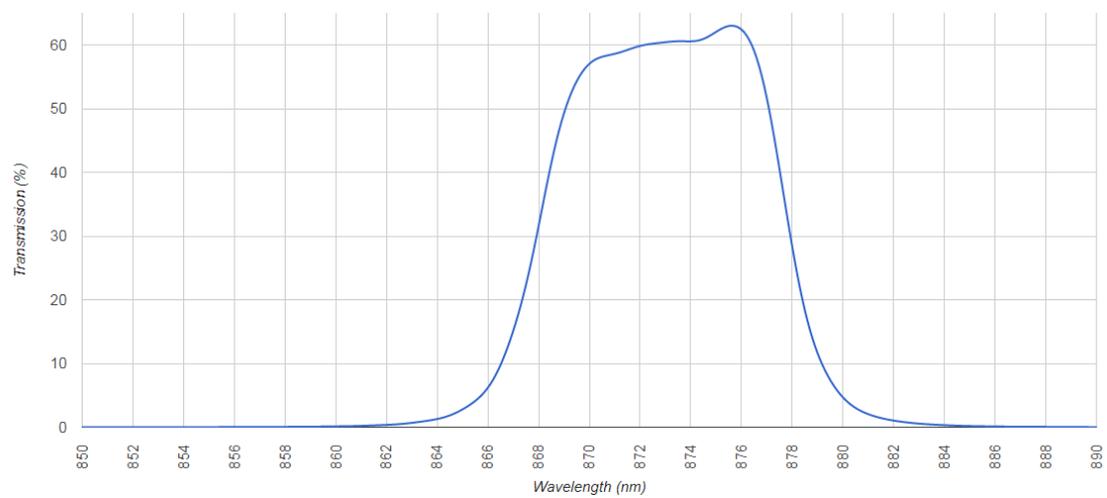


Figura 22: Curva de transmisión del filtro 870FS10

8. Análisis de riesgos

Este apartado consiste en identificar los riesgos que puedan afectar al proyecto, estimar la probabilidad de que ocurran y determinar el grado en el que puedan perjudicar al proyecto. Esta es una manera proactiva de actuar ante cualquier situación que pueda poner en peligro el cumplimiento de los objetivos en los plazos previstos en la planificación.

Para cuantificar tanto el impacto en el proyecto como la probabilidad de aparición de los riesgos, se va a emplear una escala de tres valores (bajo, medio y alto). Además, para cada una de las situaciones desfavorables previstas, se proponen soluciones para minimizar su aparición o para mitigar en la medida de lo posible su impacto en el proyecto.

1. Retraso en la finalización del proyecto

Existen diferentes causas que puedan hacer que el proyecto no se complete antes de la fecha prevista. Esto puede ocurrir bien por una mala planificación o por imprevistos como retrasos en la recepción del material pedido.

Probabilidad: media

Impacto: alto

Solución: para evitar superar la fecha de entrega prevista para el proyecto, se ha realizado una planificación realista con plazos holgados. Del mismo modo, la anticipación en la realización de los pedidos y la realización un seguimiento para mantenerse informado sobre su estado ayuda a cumplir los plazos.

2. Problemas en el filtrado de señales

Un punto crítico en el sistema es el filtrado de señales, donde resulta complicado permitir el paso a una señal mientras se elimina totalmente el resto. El problema principal se presenta entre los LED azul y verde, ya que sus longitudes de onda central se encuentran a 50 nm aproximadamente. La anchura espectral de cada uno, además de ser diferente en cada caso, obliga al filtro a una gran precisión para que su banda de paso se adapte a la anchura de uno mientras bloquea completamente el resto.

Probabilidad: alta

Impacto: bajo

Solución: para tener una mayor respuesta a esta situación, se han adquirido dos tipos diferentes de filtros. En primer lugar unos de lámina con grandes bandas de paso pero dificultades para eliminar el resto del espectro visible, y en segundo lugar otros de cristal mucho más selectivos en frecuencia pero de mayor coste.

3. Potencia óptica insuficiente en el fotodetector

Además de la baja potencia óptica de emisión de los LED, existen gran cantidad de causas que pueden provocar que la potencia recibida en el fotodetector sea demasiado baja. Estas se pueden deber a las pérdidas de propagación de la POF, la multiplexación y demultiplexación y a los filtros.

Probabilidad: media

Impacto: alto

Solución: para obtener una señal eléctrica con cierto nivel de tensión, el fotodetector PDA100A-EC incluye un amplificador que puede aumentar la señal hasta en 70 dB. También cabe la posibilidad de procesar la fibra, como puede ser repasar el pulido de la fibra o incluso sustituir el conector SMA-SMA por un empalme entre el multiplexor y el demultiplexor. En última instancia, se podría estudiar un cambio de las fuentes LED, sustituyéndolas por otras de mayor potencia.

4. No cumplimiento de las especificaciones de ancho de banda

Es posible que debido al tiempo de subida de algún bloque del sistema óptico (fuentes LED, fibra o fotodetector) la respuesta del sistema no sea capaz de operar a la velocidad requerida de 20 kHz. En los cálculos teóricos se ha visto que el factor limitante es el fotodetector, cuanto mayor ganancia se le aplique menor ancho de banda ofrece. En caso de recibir una señal muy débil será necesaria una mayor amplificación y por tanto se estará limitando la velocidad de operación del sistema.

Probabilidad: media

Impacto: bajo

Solución: para evitar esta situación, se han revisado previamente las especificaciones de todos los dispositivos del sistema. Siguiendo con el problema de la ganancia, se pueden colocar circuitos eléctricos a la salida del fotodetector para evitar la disminución del ancho de banda.

9. Metodología

Este apartado se explican los métodos y procesos que se han seguido para la elaboración del proyecto. En primer lugar se van a enumerar los paquetes de trabajo que se han llevado a cabo para completar el proyecto, así como detallar las tareas que los componen. Esta información se va a representar de una forma más gráfica mediante un diagrama de Gantt. A continuación se van a enumerar los equipos empleados para tomar las medidas pertinentes, justificando su utilización en cada caso. Finalmente, se van a explicar los procedimientos seguidos para obtener los resultados que permiten percibir de manera cuantitativa la validez del sistema óptico propuesto en el proyecto.

9.1. Tareas

Cada tarea contiene una serie de procesos que se llevan a cabo para posibilitar el comienzo de otras nuevas o bien lograr hitos dentro del proyecto. Para trazar un esquema organizativo de las tareas, éstas se van a englobar en bloques de trabajo de mayor volumen denominados paquetes de trabajo (PT). A continuación se muestran dichos paquetes de trabajo y las tareas que los componen.

9.1.1. Paquete de Trabajo 1: Gestión del proyecto

| Descripción del paquete de trabajo | |
|---|-----------------------------|
| Nombre: Gestión del proyecto | ID: PT1 |
| Fecha de inicio/fin: 20/02/2017 – 22/09/2017 | Duración: 22 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 1.1: Gestión y coordinación del proyecto | |
| Hitos | |
| Hito 5: Cierre del proyecto | |

Tarea 1.1. Gestión y coordinación del proyecto

En esta tarea se agrupan todos aquellos procesos destinados a planificar y dirigir el proyecto, como son la definición de objetivos y alcance, el control de plazos, costes y riesgos del proyecto; y el seguimiento del mismo. Por ello, tiene una duración equivalente a la del proyecto.

9.1.2. Paquete de Trabajo 2: Estudios previos

| Descripción del paquete de trabajo | |
|---|----------------------------|
| Nombre: Estudios previos | ID: PT2 |
| Fecha de inicio/fin: 20/02/2017 - 10/03/17 | Duración: 3 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 2.1: Recopilación de bibliografía | |
| Tarea 2.2: Estudio de los fundamentos de WDM | |
| Hitos | |
| Hito 1: Selección de bibliografía | |

Tarea 2.1: Recopilación de bibliografía

Esta fase inicial consiste en recopilar toda la información posible acerca del tema que aborda el proyecto, para clasificarla y filtrarla de manera que se obtenga como resultado una serie de referencias que sirvan como punto de partida para comenzar el proyecto.

Tarea 2.2: Estudio de los fundamentos de WDM

Una vez recopilada la información, comienza el análisis de los principios físicos sobre los que se basa WDM y la comprensión de los métodos utilizados en trabajos anteriores para conseguir sistemas similares al que se presenta en el documento.

9.1.3. Paquete de Trabajo 3: Selección de equipos

| Descripción del paquete de trabajo | |
|---|----------------------------|
| Nombre: Selección de equipos | ID: PT3 |
| Fecha de inicio/fin: 13/03/17 – 24/03/17 | Duración: 2 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 3.1: Selección del material de laboratorio | |
| Tarea 3.2: Planificación de reemplazos y nuevas adquisiciones | |

T3.1: Selección del material de laboratorio

Recopilar el material del laboratorio útil para el desarrollo del proyecto y realizar las pruebas pertinentes para comprobar su correcto funcionamiento o su falta de validez para llevar a cabo los objetivos

T3.2: Planificación de reemplazos y nuevas adquisiciones

Una vez recopilado el material y seleccionados los dispositivos válidos, se elabora una lista con el material extra que se necesita para llevar el proyecto.

9.1.4. Paquete de Trabajo 4: Gestión de pedidos

| Descripción del paquete de trabajo | |
|---|----------------------------|
| Nombre: Gestión de pedidos | ID: PT4 |
| Fecha de inicio/fin: 27/03/17 – 26/05/2017 | Duración: 8 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 4.1: Realización de pedidos | |
| Tarea 4.2: Control de pedidos | |

T4.1: Realización de pedidos

Engloba los procesos de contactar con las empresas y/o distribuidores que posean el material de interés, petición y aceptación de ofertas y otros procedimientos necesarios para llevar a cabo compras.

T4.2: Control de los pedidos

Esta tarea consiste en llevar un control del estado de los pedidos que se han realizado y que no se hayan recibido en cada momento, así como de asegurar en la medida de lo posible su llegada dentro de los plazos establecidos.

9.1.5. Paquete de Trabajo 5: Caracterización del material y simulación

| Descripción del paquete de trabajo | |
|--|----------------------------|
| Nombre: Caracterización del material y simulación | ID: PT5 |
| Fecha de inicio/fin: 03/04/17 – 26/05/17 | Duración: 8 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 5.1: Medición del material | |
| Tarea 5.2: Selección de filtros | |
| Tarea 5.3: Cálculos y Simulación | |
| Hitos | |
| Hito 2: Especificaciones de cada elemento | |

T5.1: Mediciones del material

Conjunto de acciones para obtener los valores reales de las características de cada elemento, como la potencia acoplada a la fibra por cada LED las pérdidas que introducen los elementos pasivos. El objetivo de realizar un balance de potencias que permita estimar la potencia que alcanza el fotodetector en cada caso. También se observan otros efectos que puedan tener sobre la señal, como la dispersión.

T5.2: Selección de filtros

Se trata de realizar una preselección de los filtros cuya curva de transmisión se asemeje más a lo necesario para el espectro de emisión de cada LED. A continuación, se cuantifica el comportamiento de cada filtro para cada fuente LED y se escogen los filtros que mejor rendimiento proporcionan.

T5.3: Cálculos y Simulación

Una vez obtenidas las características de los elementos que operan en el sistema se realiza una simulación con el programa OptSim. El objetivo es obtener una primera estimación de los resultados que han de esperarse en las pruebas físicas del sistema óptico. Una vez obtenidas estas, es posible comparar los datos obtenidos en ambos procesos y valorar si existen grandes desviaciones en las medidas o diferencias notables en el rendimiento de ambos escenarios.

En esta tarea también se incluyen los cálculos previos a realizar para poseer una referencia más sobre los resultados esperados.

9.1.6. Paquete de Trabajo 6: Montaje y Pruebas

| Descripción del paquete de trabajo | |
|--|----------------------------|
| Nombre: Montaje y pruebas | ID: PT6 |
| Fecha de inicio/fin: 29/05/2017 – 2/08/2017 | Duración: 9 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 6.1: Primer montaje y pruebas | |
| Tarea 6.2: Análisis del rendimiento del sistema | |
| Tarea 6.2: Caracterización de la solución definitiva | |
| Hitos | |
| Hito 3: Hoja de especificaciones del sistema óptico | |

T6.1: Primer montaje y correcciones

Una vez caracterizado cada elemento del sistema por separado y teniendo seleccionados los filtros a emplear, se procede a montar el sistema de transmisión completo para testarlo. Al unir todos los elementos en el mismo sistema, aparecen efectos que no se presentaban en los exámenes por separado. Ante este tipo de situaciones, se estudia la influencia de dichos fenómenos en el funcionamiento y se efectúan correcciones en caso de ser necesarias.

T6.2: Análisis del rendimiento del sistema

Una vez el sistema funcione correctamente, se realizan una serie de medidas para obtener resultados que describan de manera cuantitativa el efecto del sistema sobre las señales.

T6.3: Caracterización de la solución definitiva

Cuando el sistema se encuentra funcionando correctamente, se cuantifican sus características y los márgenes de funcionamiento. El objetivo de esta tarea es proporcionar información acerca de las condiciones en las que opera el sistema correctamente y la desviación que se permite en cada una de ellas sin que su comportamiento se vea perjudicado.

9.1.7. Paquete de Trabajo 7: Redacción de la memoria y correcciones del sistema

| Descripción del paquete de trabajo | |
|---|----------------------------|
| Nombre: Redacción de la memoria | ID: PT7 |
| Fecha de inicio/fin: 14/08/2017 – 22/09/17 | Duración: 5 semanas |
| Tareas | |
| Tarea 7.1: Redacción de la memoria | |
| Tarea 7.2: Correcciones del sistema | |
| Hitos | |
| Hito 4: Entrega de la memoria | |

Tarea 7.1: Redacción de la memoria

Una vez conseguidos los objetivos definidos al comienzo del proyecto, se procede a la recopilación de los resultados y se procede a redactar el documento que sirve como memoria.

Tarea 7.2: Correcciones del sistema

Durante la elaboración de la memoria, pueden surgir algunas dudas sobre resultados que se hayan podido obtener. Del mismo modo, es conveniente dejar un periodo de algunas semanas para intentar optimizar el diseño. Esta tarea, se realiza de forma paralela a la escritura de la memoria y sirve para detectar y corregir imperfecciones en el sistema o errores cometidos para tomar medidas anteriores.

9.1.8. Diagrama de Gantt

A continuación se van a mostrar los paquetes de trabajo y las tareas que los componen en un diagrama de Gantt (Figura 23) para exponer el tiempo dedicado a cada tarea de una manera gráfica.

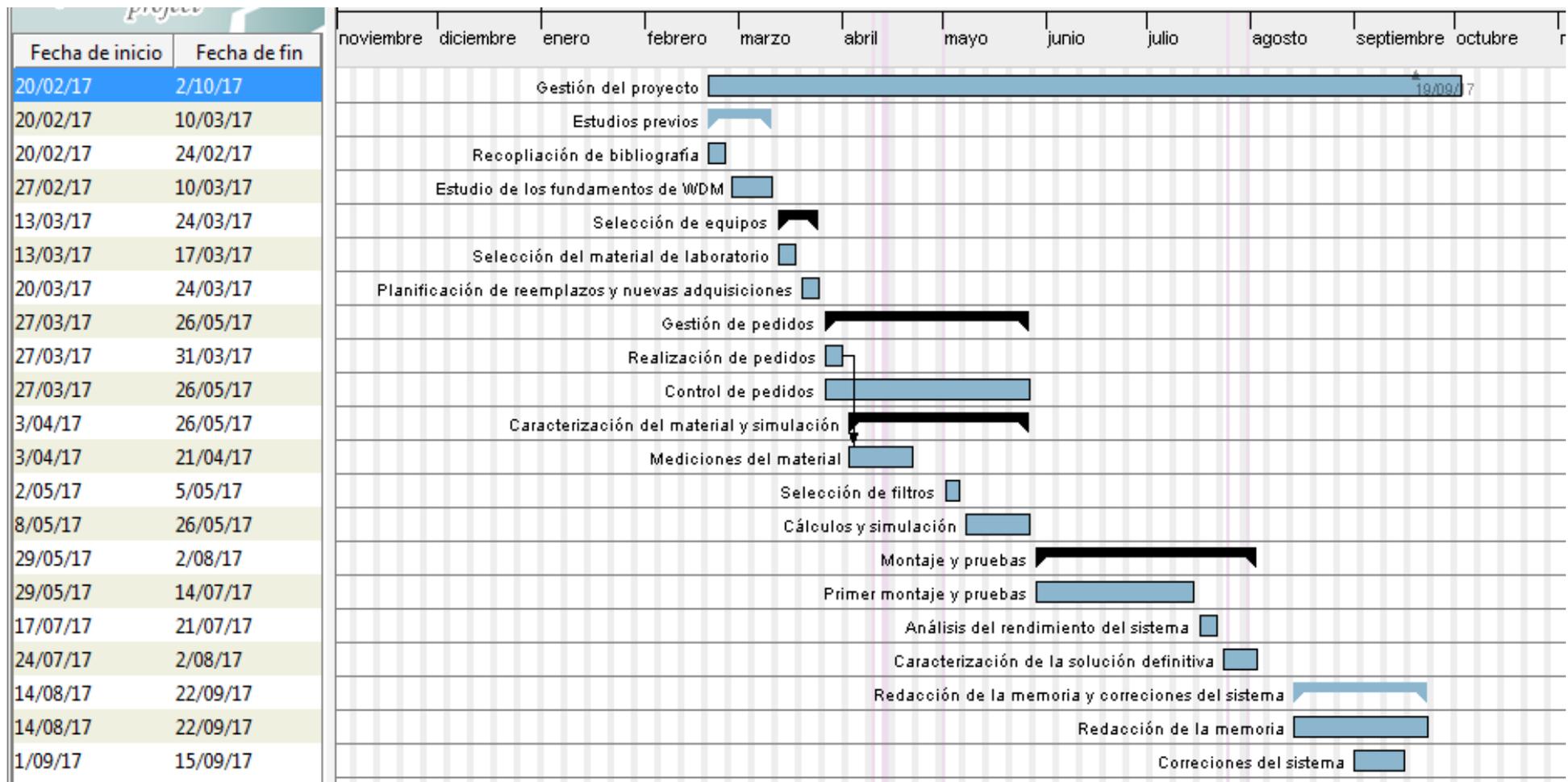


Figura 23: Diagrama de Gantt

9.2. Equipos

Este apartado recoge los equipos empleados en el proyecto para recoger medidas y obtener resultados. A diferencia de los materiales fungibles que componen la solución presentada, estos equipos no son exclusivos para el presente trabajo, y pueden ser empleados en otros proyectos posteriores

Fuente de alimentación Agilent E36210A

Esta fuente (Figura 24-izda) se ha empleado para alimentar el circuito controlador de los LED que compone el bloque emisor. Ha sido utilizado durante todas las fases de testeo de dicho circuito, al que se han introducido diferentes niveles de voltaje con la fuente de alimentación para comprobar la respuesta de los LED en cada caso.

Generador de Funciones Keysight 33210A

Este equipo (Figura 24-dcha) es necesario para introducir una señal que module cada LED con unos parámetros determinados de forma, frecuencia y amplitud. Esta señal moduladora es la que induce que la emisión del LED sea de una manera concreta.



Figura 24: Fuente de alimentación Agilent E36210A (izda) y Generador de Funciones Keysight 33210A (dcha)

Osciloscopio Agilent DSO3102A

El osciloscopio (Figura 25-izda) se utiliza para visualizar las señales eléctricas recibidas en el sistema y las originadas en el generador de funciones, para compararlas en cada configuración y valorar el efecto de la transmisión en cada caso.

Multímetro Keysight 34401A

Equipo utilizado para medir la tensión de salida del fotodetector para cada prueba (Figura 25-dcha), de manera que tomando un valor de referencia y midiendo diferentes configuraciones del sistema, es posible calcular las pérdidas que introduce cada

elemento. Este equipo se ha empleado para mediciones en corriente continua, no proporciona información sobre la forma de la señal recibida como el osciloscopio.



Figura 25: Osciloscopio Agilent DSO3102A (izda) y Multímetro Keysight 34410^a (dcha)

Ordenador DELL Optiplex 790

Ordenador empleado para recoger los resultados obtenidos en las medidas. También ha sido posible comunicar este PC con el osciloscopio, de manera que los datos recogidos por este último se pueden adquirir en formato Excel de una manera cómoda. Además, el ordenador se ha empleado para otras tareas como procesado de datos y simulaciones del sistema.

Otras herramientas

En este grupo secundario se engloban otra serie de herramientas que han sido empleados en situaciones puntuales para tareas concretas.

- Soldador: para fabricar los circuitos controladores de los LED
- Polímetro: para comprobar los contactos entre soldaduras y medir tensiones internas de los circuitos.
- Herramientas de cortado y pulido de fibras

9.3. Procedimientos

Este apartado se ha dedicado a describir los procedimientos que se han seguido en el proyecto para realizar todas las medidas, tanto de caracterización de las propiedades del material empleado como las pruebas del sistema óptico completo.

9.3.1. Medición de potencia acoplada a la fibra

Una vez montado cada LED con su circuito controlador correspondiente, se alimenta con corriente continua a 5,5 V sin introducir ninguna señal moduladora. Al LED se le acopla una POF de pequeña longitud, concretamente 10 cm, para que puedan despreciarse las pérdidas de propagación. Por tanto, la potencia óptica en el extremo opuesto de la fibra se puede considerar, con alto grado de exactitud, igual a la acoplada por el LED.

Esta fibra se conecta mediante un conector SMA al fotodetector PDA100A-EC de Thorlabs, cuya señal eléctrica saliente se lleva hasta un multímetro Keysight 34401A mediante un cable BNC. El multímetro se utiliza para medir la tensión continua que sale del fotodetector y, mediante fórmula (1) obtenida de la conversión que aparece en el manual del propio dispositivo, se puede calcular la potencia óptica que recibe.

$$P_{RX} = \frac{V_{out}}{1.51 * 10^3 * R(\lambda)} \quad (1)$$

Donde R es la responsividad del fotodetector para una longitud de onda determinada. Las responsividades de los LED empleados en el proyecto para el fotodetector PDA100A-EC se muestran en la Tabla 3, cuyos datos se han extraído a su vez de la Figura 12.

| Longitud de onda (nm) | Responsividad (A/W) |
|-----------------------|---------------------|
| 470 | 0.28 |
| 523 | 0.33 |
| 650 | 0.42 |
| 870 | 0.57 |

Tabla 3: Responsividad del fotodetector PDA100A-EC para diferentes longitudes de onda

9.3.2. Caracterización de Filtros de lámina

De manera análoga a las medidas tomadas para la potencia acoplada, se sitúa cada LED en su circuito correspondiente y se alimenta con una tensión de 5 V. A la salida del LED se acopla la fibra de 10 cm cuyo extremo opuesto se conecta al PDA100A-EC de

Thorlabs. En este caso, en cada medida se coloca un fragmente del filtro Rosco e-colour+, en una cavidad del PDA100A-EC de manera que se sitúa entre el extremo de la fibra y el fotodetector.

Para cada filtro se han realizado cuatro mediciones con cada uno de los tres LED que emiten en el espectro visible (azul, verde y rojo). Se han escogido los cuatro filtros más adecuados, priorizando el bloqueo de otras longitudes de onda sobre el alto porcentaje de transmisión de la de interés.

9.3.3. Caracterización de filtros de cristal

Este procedimiento es exactamente igual al anterior con la salvedad de que en este caso los filtros evaluados son los de Andover Corporation. Con ese tipo de filtros, sí es posible medir las propiedades del LED infrarrojo.

9.3.4. Pérdidas introducidas por cada elemento

Debido a que las fuentes LED emiten a distintas longitudes de onda, las pérdidas de propagación que sufre cada señal a través de la fibra son diferentes. Por tanto, las pérdidas de potencia que provoca cada elemento que participa en el sistema óptico son diferentes para cada LED.

Para obtener las pérdidas introducidas por el multiplexor y demultiplexor se han situado en medidas diferentes entre cada fuente LED y el fotodetector, denominadas P_{MUX} y P_{DEMUX} . En todos los casos se ha tomado como referencia la potencia acoplada a la fibra medida para cada LED, P_{REF} . Con ambos datos, se calculan las pérdidas en dB de cada elemento con la fórmula (2).

$$L_{MUX/DEMUX}(dB) = |10 * \log(\frac{P_{MUX/DEMUX}}{P_{ref}})| \quad (2)$$

Para el cálculo de las pérdidas introducidas por el conector SMA-SMA que une el multiplexor y el demultiplexor es necesario un procedimiento ligeramente distinto. La referencia tomada es la misma, pero en este caso se mide también la potencia recibida sustituyendo la fibra de 10 cm por otra de 1 m, P_1 . Esta medida sirve para discriminar las pérdidas de esta fibra de las causadas por el conector. Una vez tomada dicha medida se coloca un conectoriza cada fibra y se unen mediante el conector SMA-SMA, P_2 . Con este montaje se vuelve a medir el nivel de tensión, y una vez recopilados los datos se calculan las pérdidas del conector en cuestión con la fórmula (3).

$$L_{conector} = |10 * \log(\frac{P_2}{P_{ref}*P_1})| \quad (3)$$

9.3.5. Medidas del sistema completo

Las medidas del sistema completo se han realizado utilizando los filtros de lámina ya que, como se puede comprobar en el apartado 11, ofrecen mejores resultados. Además se alimenta el módulo que contiene los tres circuitos de los LED con una tensión entre 5 y 10 V y se acopla cada uno (rojo, azul y verde) en una de las ramas del acoplador 4:1 que actúa de multiplexor. Su rama principal está unida mediante el conector SMA-SMA) a otro acoplador de iguales características. Este segundo acoplador es el que actúa como demultiplexor, y una de sus ramas se conecta al fotodetector PDA100-EC de Thorlabs.

Para cada medida, se modula un LED con una señal cuadrada de 20 kHz con amplitud 4 Vpp y Duty Cycle de 20%, ese LED será la señal de interés. Se elige esta configuración para garantizar que se cumplen los 20 kHz de ancho de banda para la anchura de pulso más desfavorable en la modulación PWM, que corresponde a un Duty Cycle del 20%. El resto de LEDs se modulan con otra señal cuadrada de 30 kHz de manera que, de no eliminarse completamente, afectarían de forma notoria a cada señal de interés recibida (aparecerían pulsos activos donde no corresponde). Para cada color se sitúa el filtro o la combinación de filtros óptima en el fotodetector y mediante un osciloscopio se visualiza la señal recibida para compararla con la introducida al LED. El objetivo en todos los casos es visualizar una señal de 20 kHz lo más parecida a la señal que modula el LED de interés y con la mayor amplitud posible, de manera que la ganancia necesaria en el fotodetector sea menor y por tanto se distorsione menos la señal.

10. Cálculos teóricos

Este apartado está dedicado a los estudios previos a las pruebas experimentales donde, utilizando las especificaciones de los componentes proporcionados por sus fabricantes, se calculan los resultados teóricos.

10.1. Balance de potencias

Para cada LED se va a calcular la potencia óptica recibida en el fotodetector. Para ello, hay que atender a los valores de potencia acoplada a la fibra y las pérdidas de los elementos pasivos del sistema óptico. Del mismo modo, la atenuación que introduce la fibra para una señal depende de la longitud de onda de la misma por lo que es otro factor a tener en cuenta en los cálculos. Esta información se muestra en la Tabla 4, donde los datos de potencia se muestran para una alimentación de 5,5 V.

| Longitud de onda (nm) | Potencia acoplada | | Atenuación fibra (dB/m) |
|-----------------------|-------------------|--------|-------------------------|
| | μW | dBm | |
| 470 | 115 | -9,39 | 0,1 |
| 530 | 79 | -11,02 | 0,09 |
| 660 | 325 | -4,88 | 0,18 |
| 870 | 151 | -8,21 | 5 |

Tabla 4: Potencia teórica acoplada a la fibra y atenuación de la fibra para cada longitud de onda

Pérdidas fibra

Se calculan como el producto de la longitud total de la fibra (2 metros de multiplexor y otros 2 de demultiplexor) por la atenuación para longitud de onda.

$$L_{\text{fibra, azul}} = l * \alpha = 4 \text{ m} * 0,1 \frac{\text{dB}}{\text{m}} = \mathbf{0,4 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{fibra, verde}} = l * \alpha = 4 \text{ m} * 0,09 \frac{\text{dB}}{\text{m}} = \mathbf{0,36 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{fibra, rojo}} = l * \alpha = 4 \text{ m} * 0,18 \frac{\text{dB}}{\text{m}} = \mathbf{0,72 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{fibra, infrarrojo}} = l * \alpha = 4 \text{ m} * 5 \frac{\text{dB}}{\text{m}} = \mathbf{20 \text{ dB}}$$

Pérdidas MUX/DEMUX

Se van a suponer unas pérdidas de 6 dB para ambos elementos, que se corresponden con la división de la potencia entrante en cuatro partes iguales.

Pérdidas conector SMA-SMA

Thorlabs, el fabricante de los conectores empleados, indica que las pérdidas de este conector son de 1 dB.

Pérdidas de filtrado

En el filtrado existen dos opciones diferentes, el empleo de filtros de lámina fabricados Rosco (indicados con un 1) y de filtros más selectivos y de fabricación más compleja de Andover Corporation (indicados como filtros 2). Se van a calcular las pérdidas introducidas para la señal de interés en cada caso utilizando ambos tipos de filtros. Se debe tener en cuenta que los filtros de papel no son compatibles con la utilización del LED infrarrojo, debido a que no es posible eliminar su señal con ellos.

Para los filtros Andover se van a tomar los porcentajes de transmisión (o lo que es lo mismo, las pérdidas) proporcionados por el fabricante; mientras que para los filtros Rosco se van a emplear los valores reales medidos, ya que en ocasiones se tienen que superponer dos diferentes.

Filtros Rosco

$$L_{\text{filtro1, azul}} = \text{abs}(10 * \log(0,2631)) = \mathbf{5,80 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{filtro1, verde}} = \text{abs}(10 * \log(0,2603)) = \mathbf{5,85 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{filtro1, rojo}} = \text{abs}(10 * \log(0,8986)) = \mathbf{0,46 \text{ dB}}$$

Filtros Andover

$$L_{\text{filtro2, azul}} = \text{abs}(10 * \log(0,63)) = \mathbf{2,00 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{filtro2, verde}} = \text{abs}(10 * \log(0,57)) = \mathbf{2,44 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{filtro2, rojo}} = \text{abs}(10 * \log(0,7)) = \mathbf{1,55 \text{ dB}}$$

$$L_{\text{filtro2, infrarrojo}} = \text{abs}(10 * \log(0,9)) = \mathbf{2,36 \text{ dB}}$$

Pérdidas totales

Con esos datos se pueden calcular las pérdidas totales del sistema para cualquier longitud de onda y filtro con la siguiente fórmula:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{mux}} + L_{\text{demux}} + L_{\text{conector}} + L_{\text{fibra}} + L_{\text{filtro}}$$

Estas pérdidas totales se recogen en la Tabla 5.

| LED | Pérdidas sin filtro (dB) | Pérdidas con Filtros Rosco (dB) | Pérdidas con Filtros Andover (dB) |
|------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Azul | 13,40 | 19,2 | 15,4 |
| Verde | 13,36 | 19,21 | 15,8 |
| Rojo | 13,72 | 14,18 | 15,27 |
| Infrarrojo | 33,00 | - | 35,36 |

Tabla 5: Pérdidas totales del sistema para cada LED y tipo de filtrado

Balance de potencias

$$P_{RX,azul,filtro1} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -9,39 - 19,2 = -28,59 \text{ dB}$$

$$P_{RX,azul,filtro2} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -9,39 - 15,4 = -24,79 \text{ dB}$$

$$P_{RX,verde,filtro1} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -11,92 - 19,13 = -31,13 \text{ dB}$$

$$P_{RX,verde,filtro2} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -11,92 - 15,8 = -27,92 \text{ dB}$$

$$P_{RX,rojo,filtro1} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -4,88 - 14,18 = -19,06 \text{ dB}$$

$$P_{RX,rojo,filtro2} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -4,88 - 15,27 = -20,15 \text{ dB}$$

$$P_{RX,infrarrojo,filtro2} = P_{Tx} - L_{TOTAL} = -8,21 - 35,36 = -43,57 \text{ dB}$$

Una vez calculadas las potencias, se presentan en la Tabla 6

| LED | P recibida filtros Rosco | | P recibida filtros Andover | |
|------------|--------------------------|---------------|----------------------------|----------------------|
| | dBm | μW | dBm | μW |
| Azul | -28,59 | 2,57 | -24,79 | 3,32 |
| Verde | -31,13 | 0,77 | -27,92 | 1,61 |
| Rojo | -19,06 | 12,42 | -20,15 | 9,66 |
| Infrarrojo | - | - | -43,57 | $4,44 \cdot 10^{-2}$ |

Tabla 6: Potencias recibidas para cada LED y tipo de filtrado

10.2. Ancho de banda del sistema

En este caso se va a calcular el ancho de banda mínimo que garantiza el sistema. Para ello se van a calcular los tiempos de subida de la fibra, el transmisor y el receptor.

10.2.1. Dispersión introducida por la fibra

Dispersión modal

Debido a que se trabaja con una fibra multimodo, se va a calcular el tiempo de subida que introduce la fibra debido a la dispersión modal. Es decir, la diferencia de tiempo que hay entre el rayo que viaja más rápido (t_1) y el que lo hace más lento (t_2).

$$t_1 = \frac{L}{c} * n_1 \qquad t_2 = \frac{L'}{c} * n_1$$

Por la Ley de Snell: $\sin \theta_1 * n_1 = \sin \theta_2 * n_2$

Y para reflexión total: $\sin \theta_1 * n_1 = 1 * n_2 \rightarrow \sin \theta = \frac{n_2}{n_1}$

Por tanto: $L' = \frac{L}{\sin \theta} = \frac{L * n_1}{n_2} \rightarrow t_2 = \frac{L}{c} * n_1 * \frac{n_1}{n_2}$

$$\Delta\tau = t_2 - t_1 = \frac{L}{c} * n_1 * \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{4}{3 * 10^8} * 1,49 * \left(\frac{1,49}{1,403} - 1 \right) = 1,232 * 10^{-9}$$

$$\Delta\tau = 1,232 \text{ ns}$$

Dispersión material

Se debe a que el índice de refracción del material, en este caso del PMMA, varía dependiendo de la frecuencia de las señales que viajan por ella, lo que implica que lo hagan a diferentes velocidades. Para calcularla se va a emplear la siguiente fórmula:

$$\Delta\tau = |Dm| * L * \Delta\lambda \quad (1)$$

Donde Dm es el coeficiente de dispersión material de una determinada fibra para una longitud de onda concreta

En la Tabla 7 se muestran los coeficientes de dispersión material para una fibra de PMMA, (*Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications*, Joseba Zubia and Jon Arrue) [2].

| Longitud de onda (nm) | Coficiente de dispersión material (ns / nm km) |
|-----------------------|--|
| 470 | -1 |
| 530 | -0.8 |
| 650 | -0.35 |
| 870 | -0.12 |

Tabla 7: Coeficiente de dispersión material para cada longitud de onda

Empleando (1) se va a calcular la dispersión material para el caso más desfavorable, es decir, para la fuente que emite a 470 nm, que además posee la mayor anchura espectral, 50 nm.

$$\Delta\tau = 1 \left(\frac{\text{ns}}{\text{nm} * \text{km}} \right) * 0,004(\text{ km}) * 50(\text{ nm}) = 0,2 \text{ ns}$$

Existe una tercera fuente de dispersión, la dispersión guía onda, que se desprecia debido a que toma valores muy inferiores a los otros dos fenómenos.

Dispersión total

Se calcula como la raíz de la suma cuadrática de los diferentes fenómenos de dispersión:

$$\Delta\tau(\text{total}) = \sqrt{\Delta\tau(\text{modal}) + \Delta\tau(\text{material})} = \sqrt{1,232^2 + 0,2^2} = 1,248 \text{ ns}$$

10.2.2. Tiempo de subida del fotodetector

El tiempo de subida del fotodetector depende del ancho de banda del mismo, que a su vez varía con la ganancia que se le introduzca. En la implementación del sistema han sido necesarias ganancias de 30 y 40 dB, según las especificaciones del fotodetector PDA100A-EC de Thorlabs los anchos de banda para dichos valores son 480 y 225 kHz respectivamente. Empleando la fórmula (1) a continuación se han calculado los tiempos de subida para cada caso, dando lugar a los siguientes resultados:

$$t_s = \frac{0,35}{BW}$$

$$G = 30 \text{ dB} \rightarrow t_s = 729,167 \text{ ns}$$

$$G = 40 \text{ dB} \rightarrow t_s = 1,556 \mu\text{s}$$

10.2.3. Tiempo de subida de los transmisores

En la Tabla 8 se recogen los valores del tiempo de subida que proporciona el fabricante para cada LED.

| LED | Tiempo de subida (ns) |
|------------|-----------------------|
| Azul | 35 |
| Verde | 145 |
| Rojo | 8 |
| Infrarrojo | 15 |

Tabla 8: Tiempos de subida de cada LED de Industrial Fiberoptics

10.2.4. Cálculo del ancho de banda garantizado del sistema

Finalmente, se va a calcular el ancho de banda que el sistema garantiza en todo momento. Para ello, se va a tomar la situación más desfavorable que corresponde a emplear el LED verde y utilizar una ganancia de 40 dB.

$$t_{s,sys} = \sqrt{t_{s,TX}^2 + t_{s,fibra}^2 + t_{s,RX}^2} = \sqrt{145^2 + 1,248^2 + 1556^2} = 1562,74 \text{ ns} = 1,563 \text{ } \mu\text{s}$$

$$BW, sis = \frac{0,35}{t_{s,sys}} = \frac{0,35}{1562,74 * 10^{-9}} = 223965,31 \text{ Hz} = 223,965 \text{ kHz}$$

Por tanto, de manera teórica el sistema asegura un ancho de banda de al menos 223,695 kHz. Este valor está casi completamente fijado por el fotodetector empleado, mientras que la fibra óptica prácticamente no tiene influencia alguna en el ancho de banda del sistema. El resultado obtenido es mucho mayor que el que se necesita para las aplicaciones mencionadas que es de 20 kHz, por lo que atendiendo al resultado teórico obtenido se cuenta con un amplio margen en este sentido.

11. Resultados

A continuación se van a mostrar los resultados que se han obtenido a lo largo del proyecto, tanto los relativos a medidas intermedias para caracterizar el material empleado como como los definitivos del sistema óptico completo.

11.1. Potencia acoplada a la fibra

Una de las medidas que se ha realizado es la potencia óptica que se acopla a cada rama de la fibra por cada LED, que resulta una medida más útil que la potencia de emisión. Los resultados obtenidos para cada tensión de alimentación de los circuitos controladores se muestran en la Figura 26. En ella, cada color corresponden a los LED de la siguiente forma: azul al LED de 470nm, verde al LED de 523 nm, rojo LED 660nm, y negro al LED infrarrojo de 870 nm. Los niveles de potencia indicados en cada caso son el promedio de cuatro medidas diferentes (ver ANEXO I) que difieren entre sí debido a factores que no permanecen controlados y por tanto no son constantes, como la temperatura.

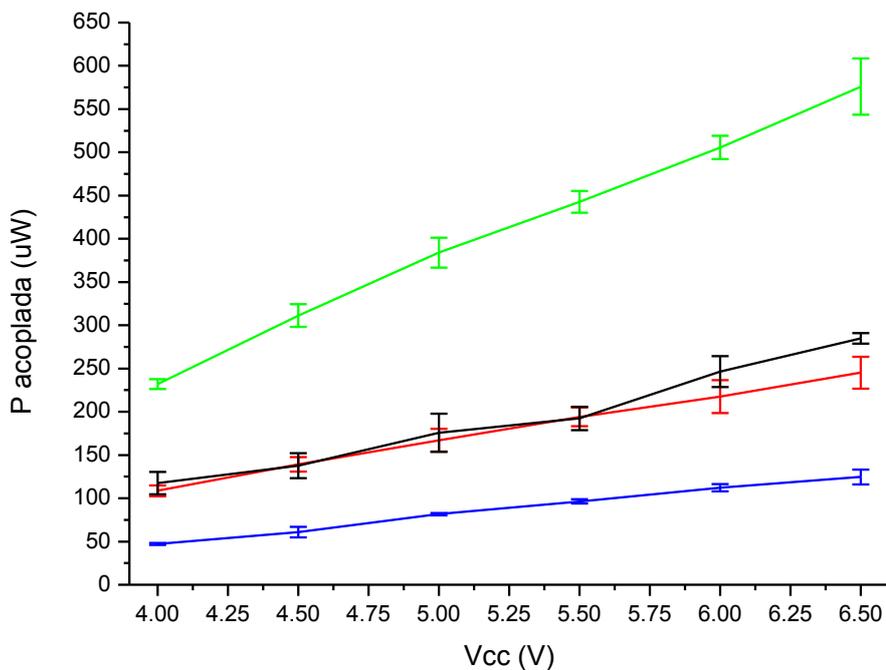


Figura 26: Potencia acoplada a la fibra por cada LED

Los resultados muestran unas potencias a 5,5 V de alimentación (tensión recomendada por el fabricante) de 238,42 μW para el LED azul, 442,74 μW para el verde, 194,16 μW para el rojo y 192,27 μW para el infrarrojo. Son valores de potencia óptica muy bajos teniendo en cuenta que se trabaja con fibra de plástico, la cual introduce una gran

atenuación. Sin embargo, puede emplearse una tensión de alimentación de hasta 7 V según las especificaciones de los fabricantes de los LED que permite un aumento de potencia de unas decenas de micro Vatios.

Además, se debe tener en cuenta que los LED tienen una anchura espectral grande, de 40 nm en caso del verde y el azul, lo que provoca que la baja potencia acoplada a la fibra por cada LED está además dispersada en un rango relativamente grande de longitudes de onda. Este efecto dificulta el proceso de filtrado por el conflicto que se crea en la banda de paso para abarcar por completo la anchura espectral de la fuente y a la vez no superarla para no permitir el paso de otras señales.

11.2. Efectividad de Filtros Rosco

Los filtros cuyo rendimiento se ha medido para el sistema óptico planteado pertenecen a la gama e-colour+ del fabricante Rosco. Se tratan de láminas semitransparentes y no son compatibles con la inclusión del LED infrarrojo de 870 nm porque son incapaces de bloquear señales fuera del espectro visible.

A continuación, en las Figuras 27,28 y 29 se muestran gráficos que ilustran el porcentaje de transmisión de cada LED para cada uno de los filtros de color rojo, verde y azul. Estos gráficos se han creado a partir de una serie de medidas recogidas en tablas disponibles en el ANEXO.

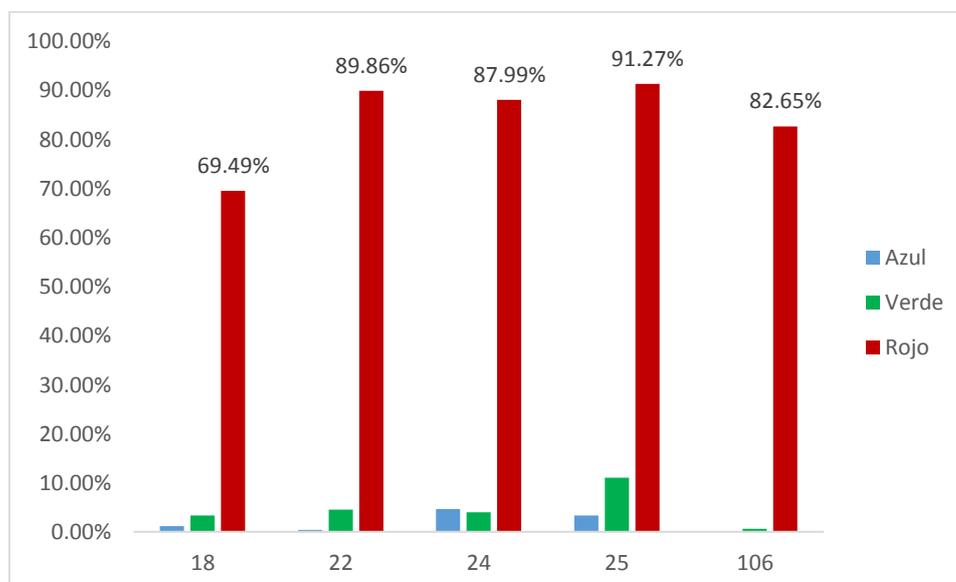


Figura 27: Transmisión de filtros rojos Rosco e-colour+ para cada LED

En la Figura 27 se puede observar el buen rendimiento de los filtros rojos para las señales emitidas por los LED del sistema. Mientras poseen un gran porcentaje de transmisión para señales de longitudes de onda cercanas al rojo (650 nm), bloquean casi por completo las del verde y azul (523 nm y 470 nm respectivamente). Se ha escogido el filtro #22 para su empleo en el sistema óptico, por ser el segundo con mayor transmitividad para el rojo sólo por detrás del #25, pero bloqueando el verde y el azul mejor que éste.

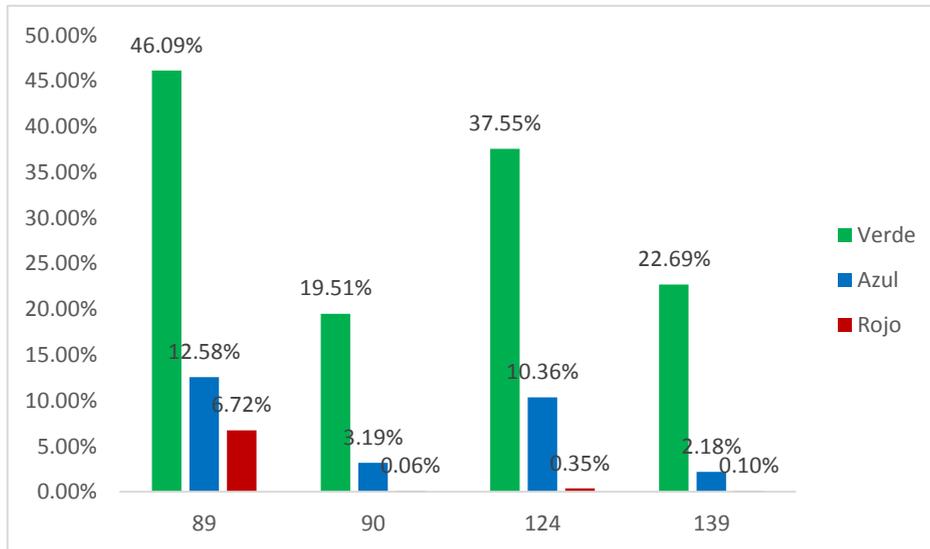


Figura 28: Transmisión de filtros verdes Rosco e-colour+ para cada LED

Los filtros verdes (Figura 28) no ofrecen una eficacia tan completa como los rojos ya que, además de tener un porcentaje de transmisión menor para su banda de paso, las señales azules tienen una transmitividad demasiado alta. Por ello, es necesario incluir una mezcla de filtros que permita discernir correctamente las señales verdes de las azules y las rojas. En este aspecto se prioriza el bloqueo completo (o como máximo una transmisión del 8%) de las señales interferentes frente a la alta transmisión de las verdes. La razón principal para seguir este criterio es que una señal recibida con un bajo nivel de potencia se puede regenerar aunque se requiera un alto coste computacional y puedan llegar a degradarse los pulsos. Sin embargo, si la señal se solapase en el espectro con otra diferente, no sería posible separarlas mediante un filtro y no podría recuperar su forma original.

La Figura 29 muestra que los filtros azules ofrecen unas propiedades similares a los verdes, aunque ofreciendo un porcentaje mayor de transmisión para todo el espectro superando incluso el 80% en caso del azul para el filtro #117. Una vez más, el problema que se presenta es el alto porcentaje de transmisión que tiene el verde para estos filtros, forzando una vez más la mezcla de ellos para obtener resultados admisibles.

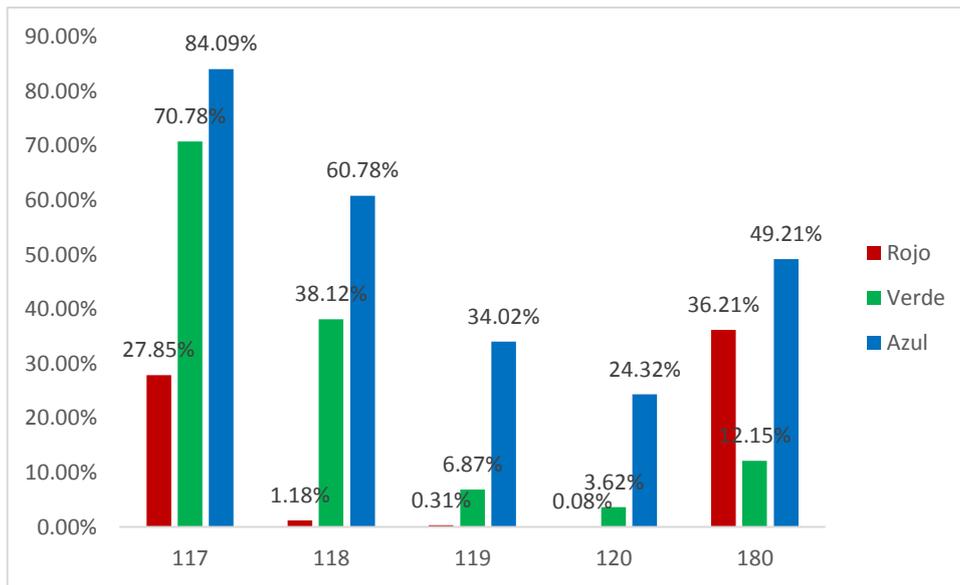


Figura 29: Transmisión de filtros azules Rosco e-colour+ para cada LED

Las mencionadas mezclas de filtros se tienen que llevar a cabo con dos filtros que sean complementarios entre sí, es decir, que sean capaces de permitir el paso de una longitud de onda y eliminar otra. Para filtrar señales verdes, los filtros amarillos son la mejor opción: aunque permiten el paso del rojo tanto o más que el verde, bloquean con gran efectividad las señales azules. Este bloqueo de las longitudes de onda inferiores al verde es la característica que complementa la ineficacia de los filtros verdes, cuya transmitividad para el azul es demasiado alta. En la Figura 30 se puede observar el porcentaje de transmisión de los 3 tipos de señales.

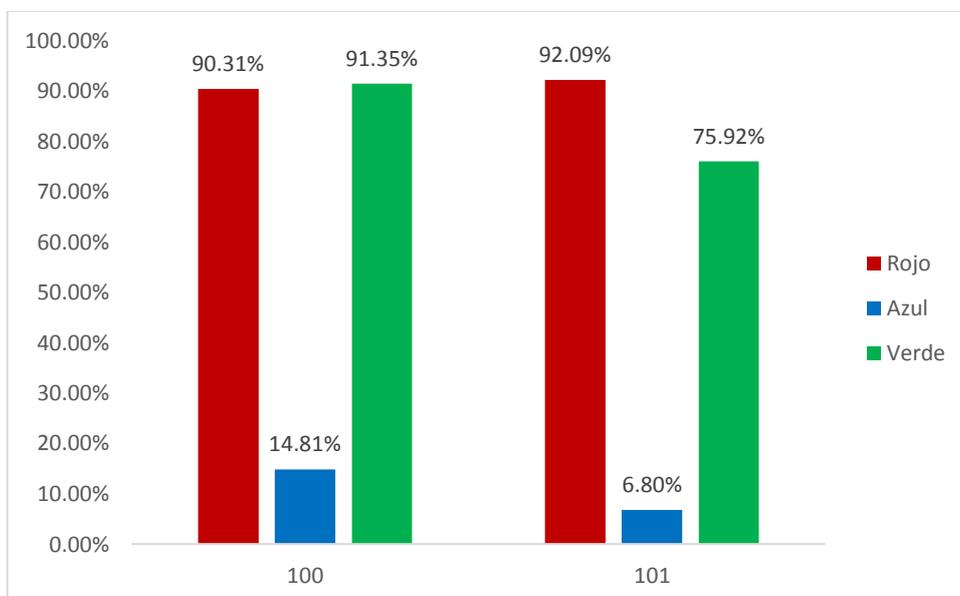


Figura 30: Transmisión de filtros amarillos Rosco e-colour+ para cada LED

Solución con filtros Rosco

Una vez analizados todos los filtros preseleccionados se ha podido elegir la combinación óptima para obtener una única señal en el extremo de cada rama del demultiplexor. Esta combinación es la siguiente:

- Para LED rojo: filtro #22
- Para LED verde: filtros #118 y #180
- Para LED azul: filtros #101 y #124

En la Figura 31 se muestra el porcentaje de transmisión de los filtros o combinaciones de filtros Rosco e-colour+ elegidos para implementarse en el sistema óptico.

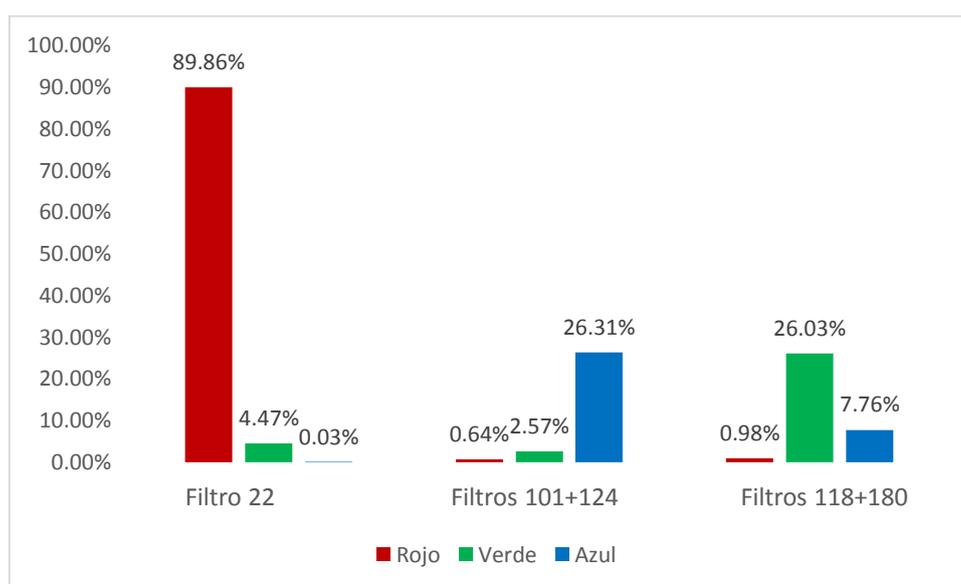


Figura 31: Transmisión de los filtros de la solución óptima con filtros Rosco

Se puede apreciar que las señales rojas no van a sufrir apenas atenuación por el proceso de filtrado, mientras que las señales verdes y azules necesitan grandes pérdidas de inserción, cercanas a los 6 dB para bloquear satisfactoriamente el resto de señales.

11.3. Efectividad de filtros Andover

Los filtros de Andover Corporation se han presentado como unos dispositivos de cristal con un costoso proceso de fabricación que actúan como filtros paso banda de manera muy selectiva, es decir, con una banda de paso estrecha. Debido a esta propiedad cada uno bloquea casi al 100% las señales provenientes de otros LED, por lo que en la Figura 32 se muestra el porcentaje de transmisión medido de los filtros para su LED correspondiente. El resto de señales se suponen bloqueadas completamente.

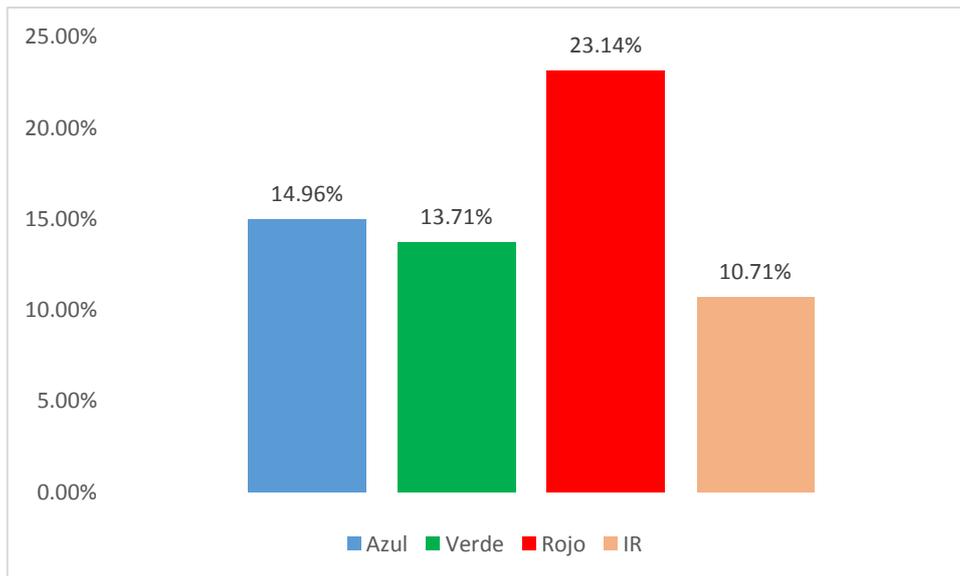


Figura 32: Porcentaje de transmisión de los filtros de Andover Corporation

Atendiendo a los resultados para estos filtros puede comprobarse cómo ofrecen un peor rendimiento para los LED seleccionados que los filtros de lámina, a pesar de sus mejores prestaciones. Esto se debe a que su pequeño ancho de banda de 10 nm no cubre toda la anchura espectral de los LED (que puede llegar hasta los 40 nm), por lo que se pierde una gran cantidad de potencia. El porcentaje de transmisión para estos filtros oscila entre el 10% y el 15% excepto el rojo, con que se alcanza una transmitividad del 23,14% para el LED del mismo color. La razón es que el filtro rojo tiene una banda de paso de 20 nm frente a los 10 nm, del resto permitiendo así captar una mayor anchura espectral y por tanto más potencia.

Cabe destacar que no ha sido posible seleccionar el resto de filtros con mayores anchuras espectrales. Para coincidir con las longitudes de onda centrales de emisión de cada LED sólo estaba disponible una banda de paso de 10 nm. Tampoco se ha contemplado la opción de escoger filtros con mayores bandas de paso que estén descentradas respecto al espectro de emisión de los LED. De hacerlo, el filtro verde no bloquearía parte de la señal azul y viceversa.

A pesar de su mal rendimiento para filtrar fuentes LED, estos filtros ofrecen un comportamiento mucho mejor para diodos láser. Esta alternativa a los LED proporciona anchuras espectrales menores y por tanto un mayor porcentaje de potencia transmitida a costa de un mayor precio.

11.4. Pérdidas del sistema óptico

En esta ocasión se presentan las pérdidas introducidas por los elementos pasivos del sistema óptico (multiplexor, demultiplexor y conector SMA-SMA) y del conjunto de todos ellos.

11.4.1. Pérdidas Multiplexor/Demultiplexor

Son los elementos encargados de, en primer lugar, unir las señales provenientes de cada rama en una única POF y, a continuación, separarlas de nuevo para filtrarlas en la etapa de recepción. Debido a que ambos elementos están compuestos en su mayoría por fibra, las pérdidas de inserción dependen fuertemente de la longitud de onda de la luz que se propaga por ella. Esto implica que los resultados van a ser diferentes para cada LED. En la Figura 33 se muestran de manera gráfica las pérdidas que introducen ambos elementos para cada LED, con datos extraídos de las tablas presentes en el ANEXO.

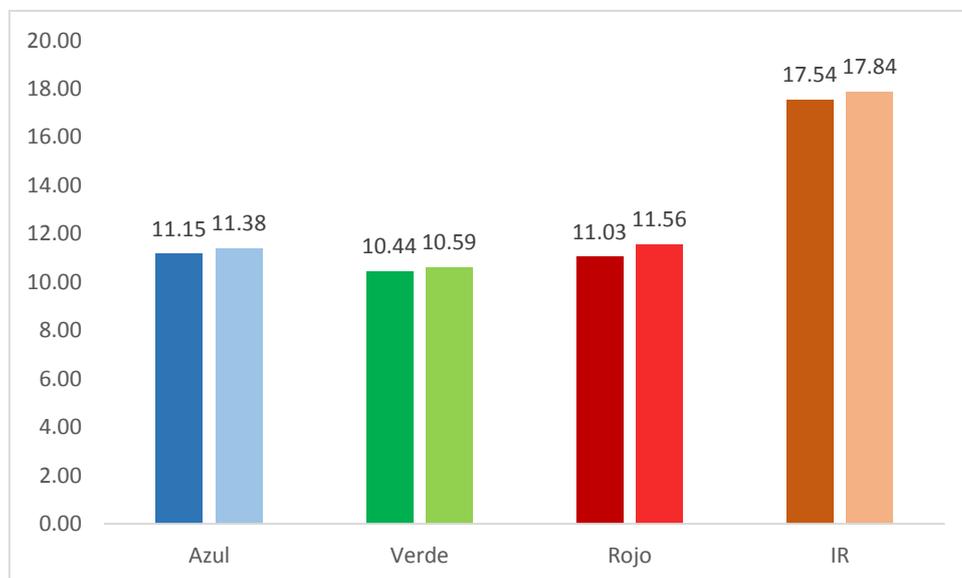


Figura 33: Pérdidas de inserción en dB del multiplexor (dcha-oscuro) y demultiplexor (izda-claro) para cada LED

Las gráficas muestran que las pérdidas de inserción son bastante similares para ambos acopladores si se emplea el mismo LED. Debido a que se trabaja con POF, es lógico que para el LED infrarrojo se produzca una atenuación mucho mayor de la señal (más de 17 dB para ambos acopladores) ya que es en el espectro visible donde menos pérdidas introduce este tipo de fibra (ver Figura 3). Las señales verdes son las que menos atenuación sufren (10,44 dB para el multiplexor y 10,59 dB para el demultiplexor) pero, debido a la reducida longitud de la fibra (sólo 4 metros), no se aprecian grandes diferencias con las rojas (11,03 y 11,56 dB) y azules (11,15 y 11,38 dB).

11.4.2. Pérdidas conector SMA-SMA

De igual manera que con el multiplexor y el demultiplexor, la atenuación que introduce el conector depende de la longitud de onda de la señal. Estas pérdidas se muestran en la Tabla 9.

| LED | Pérdidas (dB) |
|------------|---------------|
| Azul | 2.53 |
| Verde | 2.80 |
| Rojo | 1.75 |
| Infrarrojo | 18.31 |

Tabla 9: Pérdidas del conector SMA-SMA para cada LED

Como ocurre en el caso anterior, es el LED infrarrojo el que mayores pérdidas sufre con el empleo de este conector, superando los 18 dB. El resto, pertenecientes al espectro visible presentan una atenuación mucho menor ante la inclusión de este conector.

11.4.3. Pérdidas del sistema completo

Además de las pérdidas individuales para cada elemento, se han medido las pérdidas totales que sufren las señales de cada LED. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 34, donde se debe tener en cuenta que se excluyen las pérdidas introducidas por los filtros.

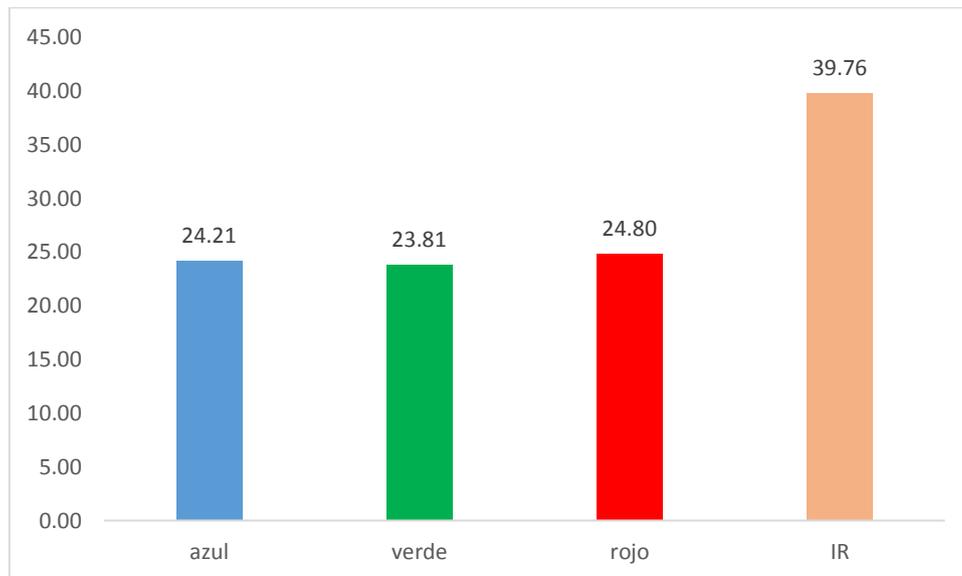


Figura 34: Pérdidas totales en dB del sistema óptico completo

Analizando las pérdidas se llega a la conclusión de que el LED infrarrojo no puede ser empleado en este sistema con POF, ya que su longitud de onda de 870 nm se encuentra demasiado alejada del espectro visible y por tanto la atenuación que sufre es demasiado

alta. En términos lineales, los casi 40 dB de pérdidas totales que introduce el sistema para dicho LED supone una reducción de la señal en un factor de 10.000. Por tanto, no tiene sentido emplear una fuente que sufre esa magnitud de pérdidas en un enlace tan corto como son 4 metros. El resto de señales sufren una atenuación alrededor de 24 dB que, a pesar de ser alta, es permisible si a la salida del fotodetector se emplean amplificadores.

Por otro lado, los resultados muestran unas pérdidas muy superiores a las obtenidas en el apartado 10, aproximadamente se encuentran 10 dB por encima. Esta desviación tan grande se debe a que los cálculos se han basado en estimaciones teóricas. Por ejemplo, los 6 dB de pérdidas introducidos por el multiplexor y el demultiplexor están aproximadamente 4 dB por debajo de las medidas experimentales.

11.4.4. Medidas de funcionamiento

Una vez analizados por separado todos los elementos que participan en el sistema se han tomado medidas del sistema completo en funcionamiento con 3 LED (azul, verde y rojo). En este montaje se han empleado los filtros Rosco e-colour con las combinaciones mostradas en el apartado 11.2 para optimizar su rendimiento. Para tomar estas medidas se han empleado 7 V para alimentar los circuitos controladores y un duty cycle del 20%, siendo esta la situación más desfavorable. En las Figuras 35,36 y 37 se muestran las señales recibidas para el LED rojo, azul y verde respectivamente.

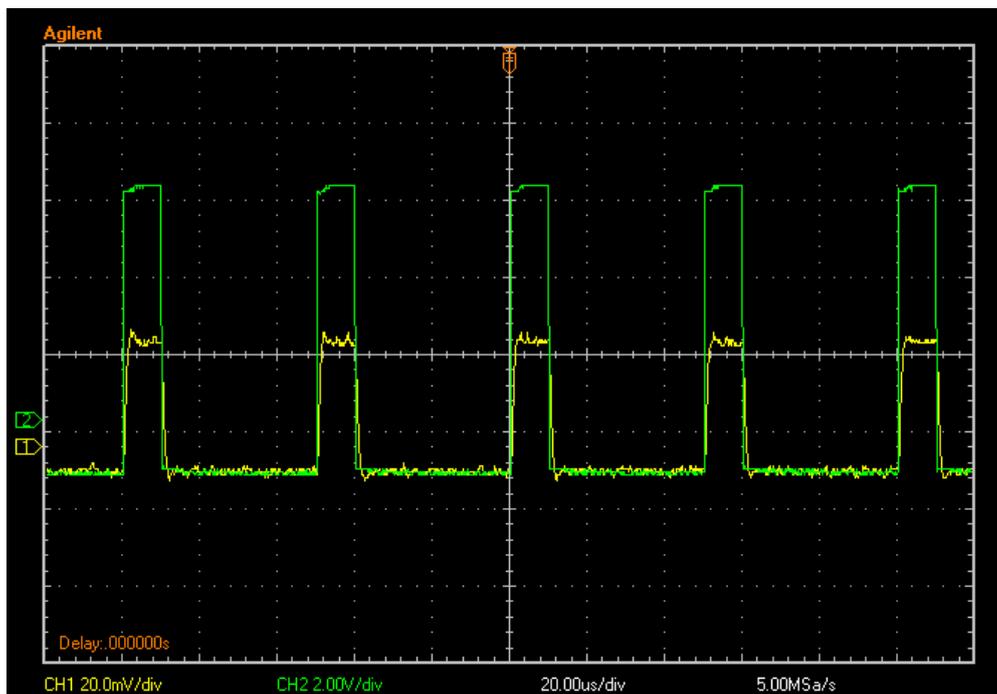


Figura 35: Señal moduladora vs recibida del LED rojo con ganancia de 30 dB

En la Figura 35 se muestra la señal emitida por el LED rojo que se ha recibido tras el filtrado y la aplicación de una ganancia de 30 dB (en color amarillo). Puede comprobarse como su forma tiene una gran similitud con la señal moduladora (en verde) por lo que es posible regenerarla en recepción. La amplitud de la señal es cercana a los 40 mVpp, lo que supone un valor aceptable para la recepción.

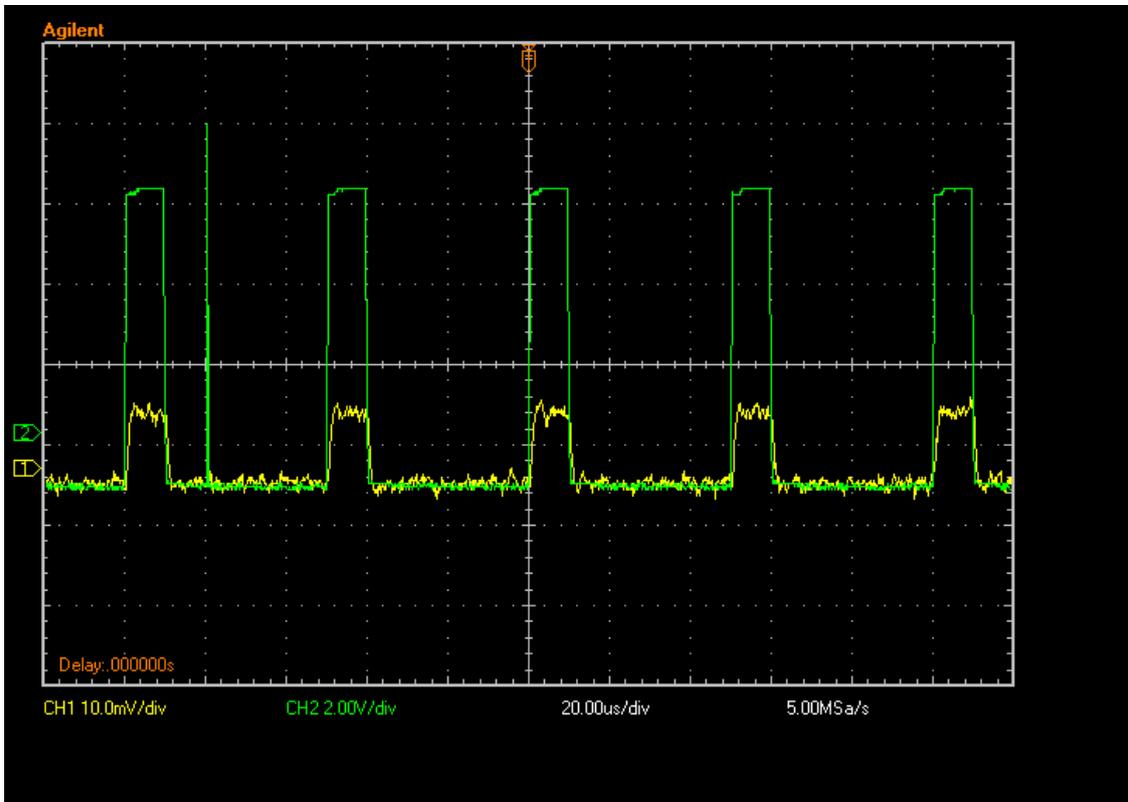


Figura 36: Señal moduladora vs recibida del LED azul con ganancia de 30 dB

En la Figura 36 se muestra la misma información para el LED azul observándose un comportamiento muy similar, con la salvedad de que el nivel de tensión recibido en este caso es de tan sólo 10 mV. Sin embargo, no conviene insertar una mayor ganancia en el fotodetector porque la deformación de la señal sería demasiado fuerte. El tiempo de subida crecería en exceso y por tanto la anchura de los pulsos disminuiría de forma notable.

En la Figura 37 se muestra la señal recibida para el caso del LED verde, donde ha sido necesario introducir una ganancia de 40 dB para obtener una señal con cierto nivel de tensión. En este caso sí se puede ver cierta deformación en la señal recibida respecto a la original a pesar de que su amplitud apenas supera los 10 mV.

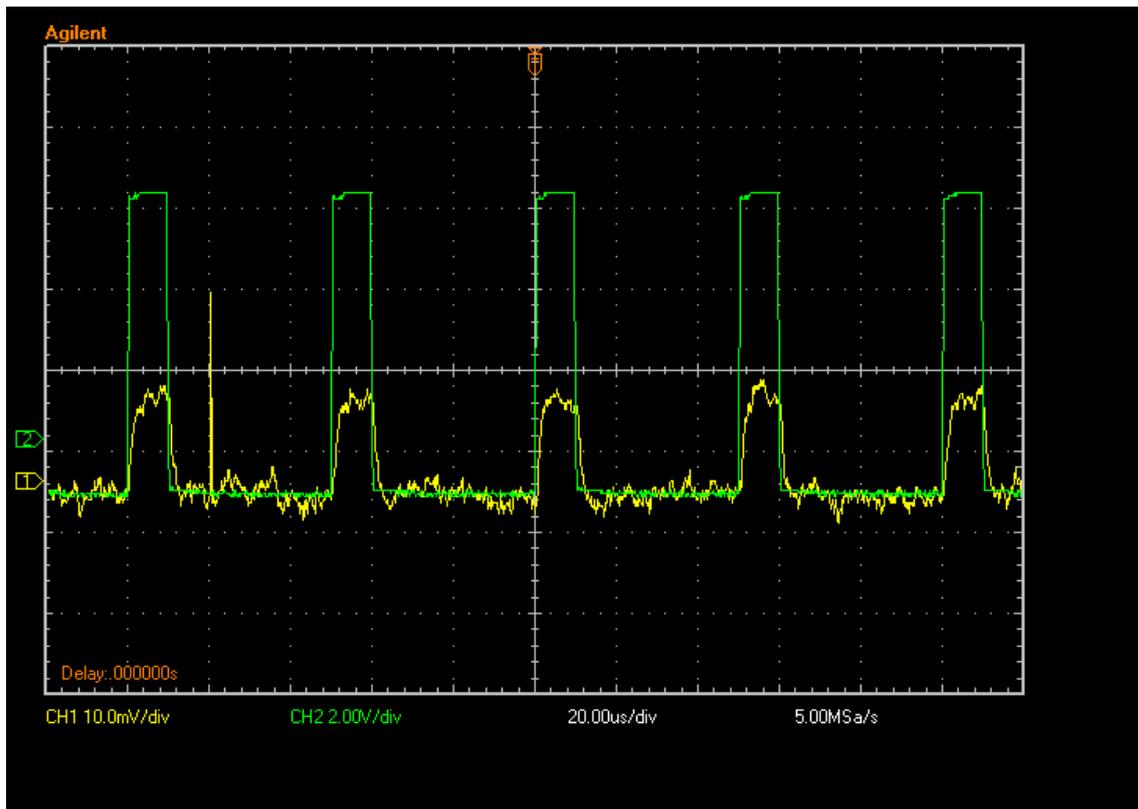


Figura 37: Señal moduladora vs recibida del LED verde con ganancia de 40 dB

A pesar de los bajos niveles de potencia recibidos se ha comprobado que el sistema es válido para transportar señales evitando interferencias por ruido electromagnético. No obstante, sustituyendo los LED por otros de mayor potencia o incluso por diodos láser podría conseguirse un nivel de señal en recepción más alto y por tanto una calidad mayor en las señales recibidas.

11.4.5. Recuperación de las señales por software

Una vez probado el sistema y almacenados los datos correspondientes a las 3 señales recibidas, se ha desarrollado un programa software mediante Matlab cuyo objetivo es restaurar su forma original. El criterio seguido para esta reconstrucción es sencillo, se analiza si cada muestra está por encima o por debajo del 30% del máximo de la señal recibida. De tener un valor de tensión superior se le asigna un 1 y si es inferior un 0, para asignarle a continuación el offset correspondiente. Una vez recuperadas las señales se ha calculado el Duty Cycle de cada una y el retraso que presenta respecto a la transmitida. En las Figuras 28,39 y 40 se muestran las señales recibidas y la comparación entre la reconstruida y la original.

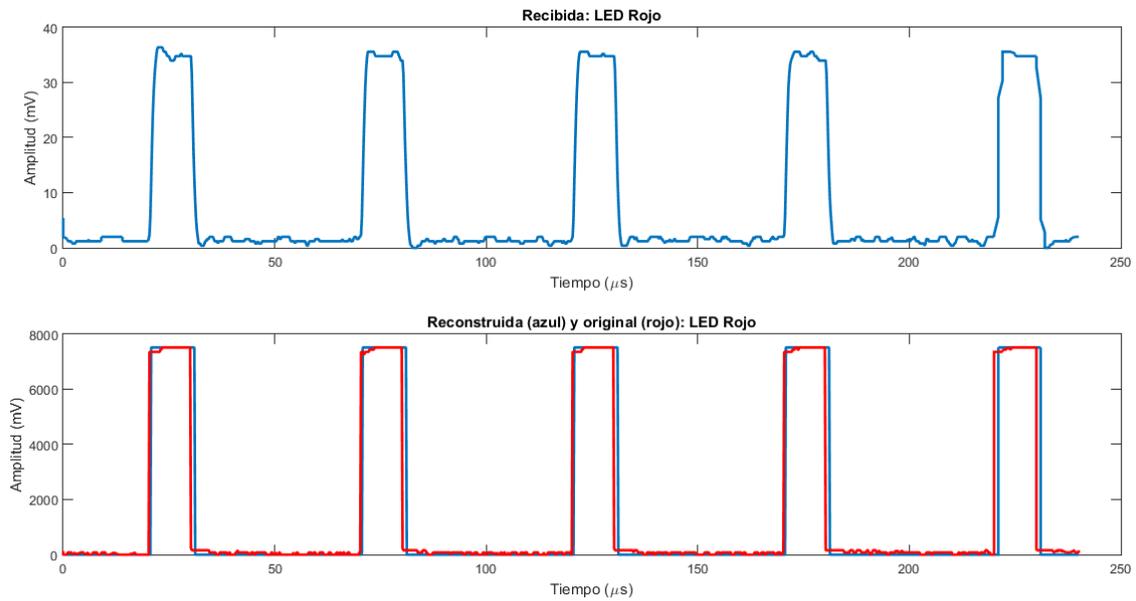


Figura 38: Señal recibida y reconstruida para el LED rojo

El Duty Cycle de la señal reconstruida es del 20,97% y está retrasada $0,12 \mu\text{s}$ respecto a la original para el LED rojo. Además en la Figura 38 se puede comprobar de manera visual cómo ambas señales tienen una forma muy similar.

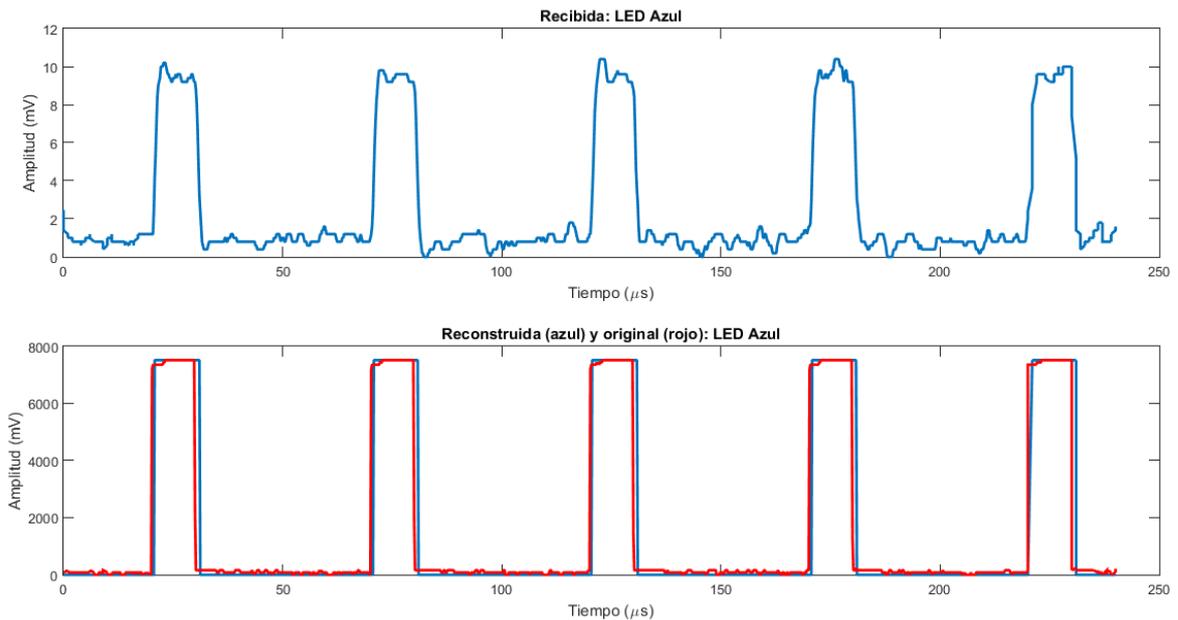


Figura 39: Señal recibida y reconstruida para el LED Azul

Para la señal azul, el Duty Cycle de la señal recibida es del 20,81% y su retraso es sólo de $0,04 \mu\text{s}$ respecto a la original.

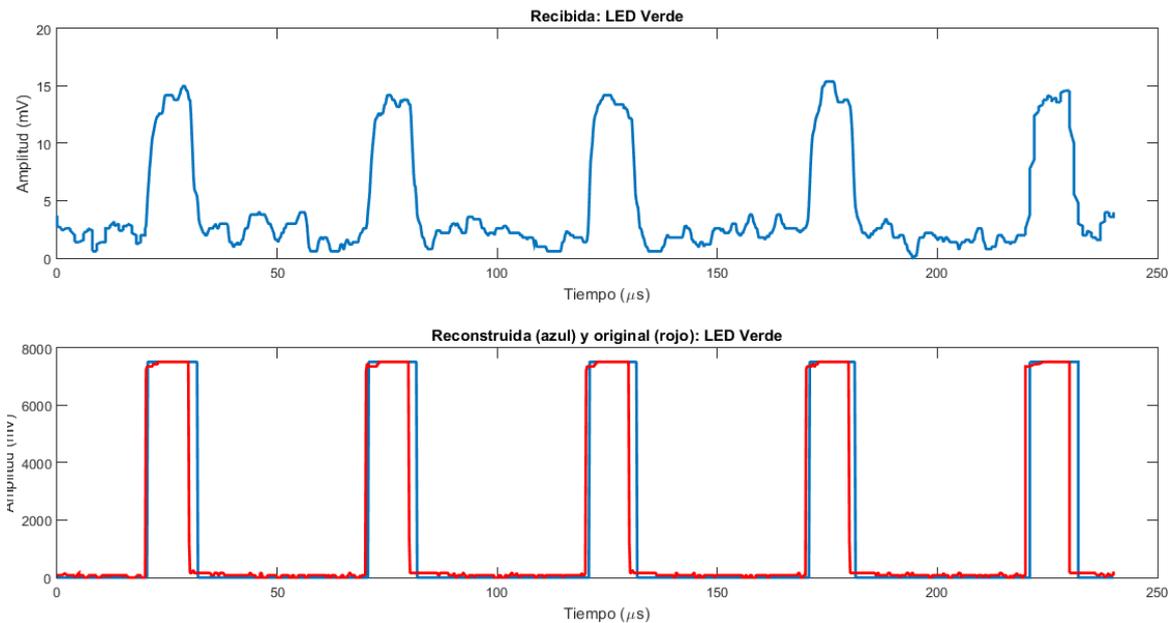


Figura 40: Señal recibida y reconstruida para el LED Verde

El Duty Cycle de la señal verde reconstruida es del 22,01% y está retrasada de 0,16 μs respecto a la original. Como se puede comprobar en la Figura 40, la señal reconstruida correspondiente a este LED es la que más difiere de la original. Esto se debe a que la ganancia introducida en el fotodetector para recibir esta señal es de 40 dB, mientras que para las otras es 30 dB, lo que provoca una mayor amplificación que a su vez acarrea una mayor deformación.

Los resultados muestran que la señal se puede recuperar de manera muy satisfactoria con señales de 20 kHz incluso para la situación más desfavorable de la modulación PWM, un Duty Cycle del 20%. No obstante, se debe tener en cuenta que la reconstrucción se ha realizado de manera computacional y fuera de banda después de tomar las medidas. Hacerlo en tiempo real empleando circuitos electrónicos puede suponer una tarea mucho más complicada y que ofrezca peores resultados.

12. Resumen de Gastos

En este apartado se va a calcular el total de los gastos del proyecto dividido en diferentes partidas.

12.1. Gastos

Esta partida del presupuesto (Tabla 10) comprende los recursos materiales fungibles, es decir, dedicados exclusivamente al proyecto y no utilizables en proyectos posteriores.

| Concepto | Unidades | Coste unitario (€/ud) | Total (€) |
|--------------------------|----------|-----------------------|-----------|
| Filtros | | | |
| 470FS10-12.5 | 2 | 98.00 | 196.00 |
| 870FS10-12.5 | 2 | 98.00 | 196.00 |
| 530FS10-12.5 | 2 | 98.00 | 196.00 |
| 650FS20-12.5 | 2 | 98.00 | 196.00 |
| Librillo Rosco e-colour+ | 1 | 5.74 | 5.74 |
| Subtotal (€) | | 789.74 | |
| LED/Receptores | | | |
| IF-E91D | 4 | 4.88 € | 19.52 |
| IF-E92A | 4 | 14.38 € | 57.52 |
| IF-E92B | 4 | 14.38 € | 57.52 |
| IF-E93 | 4 | 10.63 € | 42.52 |
| IF-E97 | 4 | 6.50 € | 26 |
| Subtotal (€) | | 203.08 | |
| Conectores | | | |
| ADASMA (SMA-SMA) | 1 | 14.50 | 14.50 |
| Thorlabs BFT1 | 6 | 72.50 | 435.00 |
| Thorlabs B11040A | 6 | 18.60 | 111.60 |
| Subtotal (€) | | 561.10 | |
| Fibra | | | |
| Toray PFEU-CD1002-22-E | 1 | 50.00 | 50.00 |
| Acoplador 4:1 Harting | 2 | 10.00 | 20.00 |
| Subtotal (€) | | 70.00 | |
| Otros | | | |
| Material para circuitos | - | 3.6 | 3.6 |
| Cables BNC | 2 | 3.88 | 7.76 |
| Subtotal (€) | | 11.36 | |
| Total Gastos (€) | | 1635.28 | |

Tabla 10: Partida de Gastos

12.2. Subcontrataciones

En este trabajo no se ha llevado a cabo ninguna subcontratación.

12.3. Amortizaciones

En este grupo (Tabla 11) se recogen los equipos que se emplean en el proyecto que no ha sido necesario adquirir y que pueden utilizarse para trabajos posteriores.

| Concepto | Coste (€) | Vida útil (h) | Horas de utilización (h) | Total (€) |
|-------------------------------|-----------|---------------|--------------------------|-----------|
| Ordenador Dell Optiplex 790 | 250 | 4000 | 250 | 15.63 |
| Multímetro Keysight 34401A | 1300 | 10000 | 80 | 10.40 |
| Generador Keysight 33210A | 1450 | 10000 | 50 | 7.25 |
| Osciloscopio Agilent DSO3102A | 500 | 12000 | 50 | 2.08 |
| Fotodetector PDA100A-EC | 321 | 5000 | 80 | 5.14 |
| Fuente Agilent E36210A | 1000 | 15000 | 80 | 5.33 |
| Total (€) | | | 45.83 | |

Tabla 11: Partida de amortizaciones

12.4. Recursos Humanos

Partida dedicada al coste del personal involucrado en el proyecto, Tabla 12.

| Nombre | Coste horario (€/h) | Horas (h) | Total |
|------------------|---------------------|--------------|-------|
| Javier Herrera | 30 | 600 | 18000 |
| Gaizka Durana | 80 | 100 | 8000 |
| Total (€) | | 26000 | |

Tabla 12: Partida de recursos humanos

12.5. Gastos indirectos

Se refiere a gastos no imputables a ninguna otra partida del presupuesto que corresponden al coste de la luz, agua, limpieza, etc. Se estima su coste total como el 2% del resto de costes (directos).

12.6. Imprevistos

Se refiere a gastos no imputables a ninguna otra partida del presupuesto que corresponden al coste de la luz, agua, limpieza, etc. Se estima su coste total como el 2% del resto de costes (directos).

12.7. Total

| Concepto | Coste (€) |
|------------------------|-----------------|
| Gastos | 1635.28 |
| Amortizaciones | 45.83 |
| Horas internas | 26000.00 |
| Costes indirectos (2%) | 553.62 |
| Subtotal | 28234.73 |
| Imprevistos | 1411.74 |
| Total | 57881.20 |

Tabla 13: Coste total del proyecto

El total de gastos asciende a cincuenta y siete mil ochocientos ochenta y un euros y 20 céntimos.

13. Conclusiones

Se ha comprobado el correcto funcionamiento de un sistema óptico que emplea WDM para transportar 3 señales provenientes de diferentes LED (rojo a 650nm, verde a 523 nm y azul a 470 nm sobre una única POF). A pesar de haber obtenido resultados satisfactorios para una distancia de 4 metros, con este tipo de fibra no es posible fabricar sistemas que tengan un largo alcance debido a sus grandes niveles de atenuación. De hecho, no ha sido posible la inclusión de un LED infrarrojo que abra la posibilidad de añadir otra señal debido a la alta atenuación que ha presentado, cercana a los 5 dB/km.

Por otro lado, para las fuentes LED con las que se ha trabajado, los filtros de láminas semitransparentes han ofrecido un mejor rendimiento que otros de cristal más selectivos en longitud de onda. Esto se debe a que la anchura espectral de los LED es mayor que sus bandas de paso, lo que provoca que se bloquee gran parte de la potencia distribuida en zonas externas a dicha banda. Los filtros de la gama Rosco e-colour+ introducen unas pérdidas cercanas a 6 dB en las señales provenientes de los LED azul y verde, mientras que ofrecen un porcentaje de transmisión mucho mayor para el LED rojo que alcanza el 90% suponiendo por tanto unas pérdidas de inserción de tan sólo 0,55 dB.

En cuanto los experimentos realizados con el sistema óptico propuesto, se han obtenido unas potencias de recepción muy bajas debido a la fuerte atenuación que introducen los elementos empleados (multiplexor, demultiplexor, fibra, conector y filtros). Dichos valores oscilan entre los 10 y los 40 mV, y pueden suponer un problema para la regeneración de la señal en etapas posteriores. Tampoco conviene aplicar una ganancia muy grande en el fotodetector porque de hacerlo se provocaría la deformación de la señal. Es preferible recuperarla en posteriores etapas con circuitos electrónicos externos, e incluso hacerlo en más de un paso para respetar al máximo la forma de la señal.

Por tanto, a pesar de los resultados obtenidos se puede optimizar el sistema óptico propuesto con algunas modificaciones, sobre todo para aumentar los niveles de tensión obtenidos en recepción. La sustitución de las fuentes LED empleadas por diodos láser puede proporcionar un mejor aprovechamiento de los filtros de cristal por su menor anchura espectral que sí quedaría totalmente cubierta por las bandas de paso. Además, debido al incremento de potencia óptica de emisión que supondría este cambio, los niveles de potencia recibidos también aumentarían.

Referencias

- [1] Avago Technologies, «Fiber versus Copper Links: Making the Right Choice for Industrial Environments,» 2012.
- [2] U. Fischer y M. Haupt, «Multi-colored WDM over POF System for Triple-Play,» de *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Wernigerode, 2008.
- [3] J. Zubia y J. Arrue, «Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications,» *Optical Fiber Technology* 7, pp. 101-140, 2006.
- [4] M. S. Ab Rahman, L. S. Supian, H. Guna, M. H. Harun y K. Jumari, «Performance of Thin-Film as Wavelength Filter in WDM-POF Network,» *Americal Journal of Applied Sciences*, pp. 180-185, 2012.
- [5] M. Sulaiman, N. Arsad, H. Ramza, M. H. Harun, H. Guna, F. NASimi y M. S. Ab-Rahman, «Wavelength Division Multiplexing Network over Polymer Optical Fiber using Fabricated Couplers for Informatics Communications,» *Procedia Technology, Science Direct*, pp. 1211-1217, 2013.
- [6] R. Kruglov, J. Vinogradov, O. Ziemann y W. Huber, «Application of 4-channel LED Module for WDM Transmission over SI-POF,» *POF-AC, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm*, 2016.
- [7] R. Kruglov, J. Vinogradov, S. Loquai, O. Ziemann, C. A. Bunge, T. Hager y U. Strauss, «21.4 Gb/s Discrete Multitone Transmission over 50-m SI-POF employing 6-channel WDM,» de *Optical Fiber Communications Conference*, San Francisco, CA, EEUU, 2014.
- [8] P. . J. Pinzón, I. Pérez Garcilópez y C. Vázquez, «Efficient Multiplexer/Demultiplexer for Visible WDM Transmission over SI-POF,» *Journal of Lightwave Technology*, pp. 3711-3178, 17 Septiembre 2015.
- [9] T. Freitas, C. Marcondes y R. Ribeiro, «A Simple and Inexpensive Optical Power Monitor for Two Visible Wavelength WDM Channels in Plastic Optical Fibre Links,» *IOPScience*, nº 27, 2016.

ANEXO

En este anexo se presentan las tablas que recogen todos los resultados de las medidas más significativas, a partir de los cuales se han extraído gráficos y figuras presentados en el apartado 11.

Potencia acoplada a las fibras

En las siguientes tablas aparecen los valores de tensión medidos con el multímetro para cada LED y los valores de potencia recibida que les corresponden. Tanto las medidas como los cálculos se han llevado a cabo como se explica en el apartado 9.3

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 48.73 | 46.54 | 47.06 | 45.91 | 47.06 |
| 4.5 | 63.77 | 51.85 | 63.97 | 63.74 | 60.83 |
| 5 | 82.86 | 80.32 | 80.71 | 82.71 | 81.65 |
| 5.5 | 96.77 | 93.64 | 95.34 | 99.87 | 96.41 |
| 6 | 113.86 | 109.46 | 108.21 | 117.14 | 112.17 |
| 6.5 | 117.66 | 116.97 | 131.45 | 132.44 | 124.63 |

Tabla 14: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED azul

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 125.66 | 120.48 | 121.71 | 118.99 | 121.71 |
| 4.5 | 161.23 | 133.04 | 161.71 | 161.16 | 154.29 |
| 5 | 206.39 | 200.38 | 201.30 | 206.03 | 203.52 |
| 5.5 | 239.29 | 231.88 | 235.90 | 246.62 | 238.42 |
| 6 | 279.71 | 269.30 | 266.34 | 287.46 | 275.70 |
| 6.5 | 288.69 | 287.06 | 321.31 | 323.65 | 305.18 |

Tabla 15: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED azul

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 119.47 | 115.41 | 112.38 | 115.2 | 115.62 |
| 4.5 | 157.71 | 148.32 | 162.92 | 151.24 | 155.05 |
| 5 | 197.38 | 181.73 | 199.86 | 186.62 | 191.40 |
| 5.5 | 228.39 | 216.08 | 215.22 | 222.77 | 220.62 |
| 6 | 260.68 | 246.94 | 246.44 | 253.68 | 251.94 |
| 6.5 | 275.83 | 271.97 | 293.31 | 306.89 | 287.00 |

Tabla 16: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED verde

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 239.76 | 231.61 | 225.53 | 231.19 | 232.02 |
| 4.5 | 316.50 | 297.65 | 326.95 | 303.51 | 311.15 |
| 5 | 396.11 | 364.70 | 401.08 | 374.51 | 384.10 |
| 5.5 | 458.34 | 433.63 | 431.91 | 447.06 | 442.74 |
| 6 | 523.14 | 495.56 | 494.56 | 509.09 | 505.59 |
| 6.5 | 553.54 | 545.80 | 588.62 | 615.87 | 575.96 |

Tabla 17: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED verde

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 73.45 | 64.73 | 70.77 | 66.71 | 68.92 |
| 4.5 | 91.12 | 80.47 | 89.06 | 92.33 | 88.25 |
| 5 | 110.43 | 95.31 | 103.89 | 114.35 | 106.00 |
| 5.5 | 123.88 | 114.06 | 123.74 | 130.87 | 123.14 |
| 6 | 133.89 | 123.73 | 141.83 | 152.28 | 137.93 |
| 6.5 | 149.44 | 142.57 | 161.57 | 168.34 | 155.48 |

Tabla 18: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED rojo

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 115.82 | 102.07 | 111.59 | 105.19 | 108.66 |
| 4.5 | 143.68 | 126.88 | 140.43 | 145.58 | 139.14 |
| 5 | 174.12 | 150.28 | 163.81 | 180.31 | 167.13 |
| 5.5 | 195.33 | 179.85 | 195.11 | 206.35 | 194.16 |
| 6 | 211.12 | 195.10 | 223.64 | 240.11 | 217.49 |
| 6.5 | 235.64 | 224.80 | 254.76 | 265.44 | 245.16 |

Tabla 19: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED rojo

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 81.84 | 109.57 | 107.66 | 105.62 | 101.17 |
| 4.5 | 100.27 | 129.16 | 114.07 | 130.89 | 118.60 |
| 5 | 120.4 | 154.39 | 157.97 | 172.01 | 151.19 |
| 5.5 | 146.81 | 173.12 | 164.43 | 177.59 | 165.49 |
| 6 | 233.76 | 194.78 | 219.13 | 200.88 | 212.14 |
| 6.5 | 241.36 | 244.32 | 254.01 | 241.47 | 245.29 |

Tabla 20: Tensión medida en el fotodetector para diferentes valores de tensión, LED infrarrojo

| V alimentación (V) | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Promedio |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 95.09 | 127.30 | 125.08 | 122.71 | 117.55 |
| 4.5 | 116.50 | 150.06 | 132.53 | 152.07 | 137.79 |
| 5 | 139.89 | 179.38 | 183.54 | 199.85 | 175.66 |
| 5.5 | 170.57 | 201.14 | 191.04 | 206.33 | 192.27 |
| 6 | 271.59 | 226.30 | 254.60 | 233.39 | 246.47 |
| 6.5 | 280.42 | 283.86 | 295.12 | 280.55 | 284.99 |

Tabla 21: Potencia acoplada a la fibra para diferentes valores de tensión, LED infrarrojo

Porcentaje de transmisión de los filtros Rosco e-colour+

Para cada LED se han probado todos los filtros preseleccionados para determinar el porcentaje de la potencia incidente que pasa a través de ellos. En las tablas 22, 23 y 24 se muestran los valores de tensión obtenidos en el multímetro para cada una de las cuatro medidas realizadas, así como los valores de referencia (misma medida sin colocar ningún filtro). Se ha realizado el promedio de las medidas para cada filtro y se ha calculado el porcentaje de transmisión de cada uno de ellos. Los detalles del procedimiento seguido para tomar las medidas esta explicado en el apartado 9.3.2.

| Nº filtro | Color | Medida 1 (mV) | Medida 2 (mV) | Medida 3 (mV) | Medida 4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|-----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| s/n | s/n | 98.92 | 97.98 | 97.97 | 97.97 | 98.21 | - |
| 19 | rojo | 1.62 | 0.94 | 0.93 | 0.93 | 1.11 | 1.13% |
| 22 | rojo | 0.37 | 0.32 | 0.38 | 0.37 | 0.36 | 0.37% |
| 24 | rojo | 4.61 | 4.61 | 4.52 | 4.51 | 4.56 | 4.64% |
| 25 | rojo | 3.23 | 3.22 | 3.25 | 3.23 | 3.23 | 3.29% |
| 106 | rojo | 0.1 | 0.11 | 0.1 | 0.11 | 0.11 | 0.11% |
| 100 | amarillo | 14.66 | 14.53 | 14.47 | 14.51 | 14.54 | 14.81% |
| 101 | amarillo | 6.69 | 6.67 | 6.69 | 6.66 | 6.68 | 6.80% |
| 89 | verde | 12.38 | 12.37 | 12.38 | 12.28 | 12.35 | 12.58% |
| 90 | verde | 3.14 | 3.13 | 3.11 | 3.12 | 3.13 | 3.19% |
| 124 | verde | 10.26 | 10.27 | 10.07 | 10.06 | 10.17 | 10.36% |
| 139 | verde | 2.15 | 2.16 | 2.13 | 2.13 | 2.14 | 2.18% |
| 117 | azul | 82.66 | 82.64 | 82.53 | 82.49 | 82.58 | 84.09% |
| 118 | azul | 59.67 | 59.72 | 59.71 | 59.67 | 59.69 | 60.78% |
| 119 | azul | 33.43 | 33.42 | 33.38 | 33.4 | 33.41 | 34.02% |
| 120 | azul | 23.94 | 23.87 | 23.85 | 23.86 | 23.88 | 24.32% |
| 180 | azul | 48.23 | 48.31 | 48.44 | 48.35 | 48.33 | 49.21% |

Tabla 22: porcentaje de transmisión de cada filtro para el LED azul

| Nº filtro | Color | Medida 1 (mV) | Medida 2 (mV) | Medida 3 (mV) | Medida 4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|-----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| s/n | s/n | 183.92 | 184.65 | 184.06 | 183.97 | 184.15 | - |
| 19 | rojo | 6.25 | 6.24 | 5.94 | 6.02 | 6.11 | 3.32% |
| 22 | rojo | 8.19 | 8.15 | 8.39 | 8.21 | 8.24 | 4.47% |
| 24 | rojo | 7.26 | 7.27 | 7.42 | 7.38 | 7.33 | 3.98% |
| 25 | rojo | 20.36 | 20.27 | 20.31 | 20.36 | 20.33 | 11.04% |
| 106 | rojo | 1.06 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 0.57% |
| 100 | amarillo | 168.2 | 168.31 | 168.26 | 168.11 | 168.22 | 91.35% |
| 101 | amarillo | 139.87 | 139.79 | 139.8 | 139.76 | 139.81 | 75.92% |
| 89 | verde | 85.04 | 84.96 | 84.67 | 84.85 | 84.88 | 46.09% |
| 90 | verde | 35.94 | 35.91 | 35.92 | 35.89 | 35.92 | 19.51% |
| 124 | verde | 69.28 | 68.93 | 69.22 | 69.13 | 69.14 | 37.55% |
| 139 | verde | 41.79 | 41.73 | 41.87 | 41.77 | 41.79 | 22.69% |
| 117 | azul | 129.03 | 129.08 | 129.04 | 129.11 | 129.07 | 70.09% |
| 118 | azul | 67.46 | 67.26 | 67.62 | 67.54 | 67.47 | 36.64% |
| 119 | azul | 8.5 | 8.53 | 8.56 | 8.6 | 8.55 | 4.64% |
| 120 | azul | 2.44 | 2.43 | 2.41 | 2.42 | 2.43 | 1.32% |
| 180 | azul | 19.29 | 19.3 | 19.28 | 19.29 | 19.29 | 10.48% |

Tabla 23: porcentaje de transmisión de cada filtro para el LED verde

| Nº filtro | Color | Medida 1 (mV) | Medida 2 (mV) | Medida 3 (mV) | Medida 4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|-----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| s/n | s/n | 109.05 | 109.15 | 108.85 | 108.57 | 108.91 | - |
| 19 | rojo | 98.11 | 8.1 | 98.08 | 98.41 | 75.68 | 69.49% |
| 22 | rojo | 97.87 | 97.88 | 97.87 | 97.85 | 97.87 | 89.86% |
| 24 | rojo | 95.9 | 95.89 | 95.7 | 95.81 | 95.83 | 87.99% |
| 25 | rojo | 99.47 | 99.36 | 99.38 | 99.37 | 99.4 | 91.27% |
| 106 | rojo | 90.42 | 90.32 | 89.63 | 89.67 | 90.01 | 82.65% |
| 100 | amarillo | 98.47 | 98.63 | 98.09 | 98.25 | 98.36 | 90.31% |
| 101 | amarillo | 100.33 | 100.07 | 100.62 | 100.14 | 100.29 | 92.09% |
| 89 | verde | 7.35 | 7.33 | 7.31 | 7.3 | 7.32 | 6.72% |
| 90 | verde | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06% |
| 124 | verde | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.35% |
| 139 | verde | 0.11 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10% |
| 117 | azul | 30.33 | 30.35 | 30.32 | 30.3 | 30.33 | 27.85% |
| 118 | azul | 1.29 | 1.29 | 1.28 | 1.29 | 1.29 | 1.18% |
| 119 | azul | 0.34 | 0.34 | 0.35 | 0.34 | 0.34 | 0.31% |
| 120 | azul | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08% |
| 180 | azul | 39.51 | 39.45 | 39.36 | 39.44 | 39.44 | 36.21% |

Tabla 24: porcentaje de transmisión de cada filtro para el LED rojo

Del mismo modo, en las tablas 25, 26 y 27 se muestran las mismas medidas para todas las combinaciones de filtros que se han probado.

| nº filtro | color | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | %Transmisión |
|-----------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------------|--------------|
| s/n | s/n | 120.47 | 120.71 | 120.33 | 119.96 | 120.37 | - |
| 180+118 | azules | 0.34 | 0.34 | 0.31 | 0.33 | 0.33 | 0.27% |
| 101+118 | amarillo, azul | 1.18 | 1.17 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 0.98% |
| 100+118 | amarillo, azul | 1.07 | 1.08 | 1.07 | 1.08 | 1.08 | 0.89% |
| 101+124 | amarillo, verde | 0.75 | 0.76 | 0.79 | 0.78 | 0.77 | 0.64% |

Tabla 25: Porcentaje de transmisión con cada combinación de filtros para el LED rojo

| nº filtro | color | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | %Transmisión |
|-----------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------------|--------------|
| s/n | s/n | 120.47 | 120.71 | 120.33 | 119.96 | 120.37 | - |
| 180+118 | azules | 31.38 | 31.32 | 31.37 | 31.28 | 31.34 | 26.03% |
| 101 | amarillo | 6.69 | 6.67 | 6.69 | 6.66 | 6.68 | 5.55% |
| 101+118 | amarillo, azul | 3.82 | 3.83 | 3.81 | 3.82 | 3.82 | 3.17% |
| 101+124 | amarillo, verde | 3.07 | 3.16 | 3.11 | 3.02 | 3.09 | 2.57% |

Tabla 26: Porcentaje de transmisión con cada combinación de filtros para el LED azul

| nº filtro | color | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | %Transmisión |
|-----------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------------|--------------|
| s/n | s/n | 120.47 | 120.71 | 120.33 | 119.96 | 120.37 | - |
| 180+118 | azules | 9.35 | 9.34 | 9.34 | 9.34 | 9.34 | 7.76% |
| 101 | amarillo | 109.87 | 109.79 | 109.80 | 109.76 | 109.81 | 91.22% |
| 101+118 | amarillo, azul | 48.88 | 48.84 | 48.87 | 48.87 | 48.87 | 40.60% |
| 101+124 | amarillo, verde | 31.19 | 32.02 | 31.78 | 31.67 | 31.67 | 26.31% |

Tabla 27: Porcentaje de transmisión con cada combinación de filtros para el LED verde

Porcentaje de transmisión de los filtros de Andover Corporation

Las medidas tomadas para los filtros de Andover se han llevado de forma análoga a las anteriores, sus resultados se muestran a continuación. En este caso, debido a la alta capacidad de bloquear señales fuera de su banda de paso

| Azul | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|
| Referencia | 79.55 | 81.11 | 78.46 | 78.83 | 79.49 | - |
| Filtro | 11.98 | 11.80 | 11.86 | 11.92 | 11.89 | 14.96% |

Tabla 28: Porcentaje de transmisión del filtro Azul de Andover

| Verde | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|
| Referencia | 214.76 | 215.57 | 218.06 | 218.30 | 216.67 | - |
| Filtro | 29.64 | 29.48 | 29.94 | 29.75 | 29.70 | 13.71% |

Tabla 29: Porcentaje de transmisión del filtro Verde de Andover

| Rojo | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|
| Referencia | 115.97 | 115.33 | 115.04 | 116.00 | 115.59 | - |
| Filtro | 27.15 | 26.27 | 26.34 | 27.22 | 26.75 | 23.14% |

Tabla 30: Porcentaje de transmisión del filtro Rojo de Andover

| IR | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) | % Transmisión |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|
| Referencia | 183.61 | 183.95 | 183.39 | 184.41 | 183.84 | - |
| Filtro | 19.62 | 19.62 | 19.94 | 19.55 | 19.68 | 10.71% |

Tabla 31: Porcentaje de transmisión del filtro Infrarrojo de Andover

Pérdidas MUX/DEMUX

En las siguientes tablas se muestran los valores tensión medidos en recepción con el multímetro cuando se coloca, primero, el multiplexor y, a continuación, el demultiplexor.

| Color | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Azul | 7.40 | 7.87 | 7.73 | 7.95 | 7.74 |
| Verde | 20.09 | 19.76 | 19.73 | 20.16 | 19.94 |
| Rojo | 9.65 | 9.95 | 9.89 | 9.38 | 9.72 |
| IR | 2.92 | 3.04 | 2.93 | 2.77 | 2.92 |

Tabla 32: Valores de tensión medidos para cada LED insertando el multiplexor

| Color | M1 (mV) | M2 (mV) | M3 (mV) | M4 (mV) | Promedio (mV) |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Azul | 6.62 | 7.48 | 7.65 | 7.60 | 7.34 |
| Verde | 19.26 | 19.20 | 19.21 | 19.38 | 19.26 |
| Rojo | 8.81 | 7.98 | 8.68 | 8.96 | 8.61 |
| IR | 2.72 | 2.72 | 2.70 | 2.74 | 2.72 |

Tabla 33: Valores de tensión medidos para cada LED insertando el demultiplexor

Con los valores de tensión presentados, se calculan los valores de potencia medios y atendiendo a la referencia adquirida anteriormente para cada LED se calculan las pérdidas introducidas por cada elemento. En la Tabla 34 se prestan los datos relativos al multiplexor y en la Tabla 35 al demultiplexor.

| Color | P _{REF} (mW) | P _{RX} (mW) | Pérdidas (dB) |
|-------|-----------------------|----------------------|---------------|
| Azul | 238.42 | 18.30 | 11.15 |
| Verde | 442.74 | 40.01 | 10.44 |
| Rojo | 194.16 | 15.32 | 11.03 |
| IR | 192.27 | 3.39 | 17.54 |

Tabla 34: Pérdidas introducidas por el multiplexor para cada LED

| Color | P _{REF} (mW) | P _{RX} (mW) | Pérdidas (dB) |
|-------|-----------------------|----------------------|---------------|
| Azul | 238.42 | 17.35 | 11.38 |
| Verde | 442.74 | 38.66 | 10.59 |
| Rojo | 194.16 | 13.57 | 11.56 |
| IR | 192.27 | 3.16 | 17.84 |

Tabla 35: Pérdidas introducidas por el demultiplexor para cada LED