

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño y fabricación de fuente de luz blanca LED acoplada a fibra



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Cilveti Álvarez, Ander

Corrés Sanz, Jesús M.

Pamplona, 15/06/2015





## Abstract

---

Based in the needs generated by a growing up biosensors market scenario, this project investigates and discusses different ways of designing and building a high-power fiber coupled LED light source in the visible spectrum. In this way, we propose new ways of improving the power coupled in the optical fiber and this spectral distribution through basic technics and structures of most of optical fiber sensors laboratories. It is followed by the design of a high-end continuous LED driver involving all the electronics needed for the development of a high power LED light source. All this will be bundled in the final design of the light source, which must be able to satisfy the needs of a commercial white light source.

Keywords: Light source, fiber coupling, optical fiber, white, LED.

## Resumen

---

Basándose en las necesidades creadas por un creciente mercado de los biosensores, este proyecto investigará y discutirá las diferentes maneras de diseñar y fabricar una fuente de luz blanca acoplada a fibra basada en tecnología LED situada en el espectro visible. Para ello, se propondrán nuevas maneras de lograr un buen acople de luz a la fibra en términos de potencia y de distribución espectral a través de distintas técnicas y estructuras típicas presentes en la mayoría de laboratorios de sensores de fibra óptica. El proyecto continuará con el diseño de un driver LED continuo de altas prestaciones, incluyendo toda la electrónica necesaria para el desarrollo de la fuente de alta potencia LED. Todo ello se unirá en el diseño final de la fuente de luz, la cual debe ser capaz de satisfacer las necesidades de una fuente de luz blanca comercial.

Palabras clave: Fuente de luz, acoplamiento a fibra, fibra óptica, blanca, LED.

# Índice

---

1.	Introducción	7
1.1.	Fuente de luz blanca LED acoplada a fibra	7
2.	Objeto y alcance del proyecto	8
3.	Tipos de fuente de luz blancas	9
3.1.	Halógena	9
3.2.	Lámparas de descarga. Deuterio y Xenón.	9
3.3.	Láser.	9
3.3.1.	Fuente de luz láser con fibra dopada mediante fósforo	10
3.4.	LED.	10
4.	Diseño Técnico	11
4.1.	Acoplamiento de luz	11
4.1.1.	Butt-Coupling	11
4.1.1.1.	Fundamento teórico	11
4.1.1.1.1.	Pérdidas geométricas	11
4.1.1.1.2.	Pérdidas de Fresnel	12
4.1.1.1.3.	Pérdidas angulares	12
4.1.1.2.	Análisis básico	13
4.1.1.3.	Selección del LED	13
4.1.1.3.1.	Características a buscar en el LED	13
4.1.1.3.2.	LED escogido	15
4.1.1.4.	Resultados obtenidos	17
4.1.1.4.1.	Posibles mejoras	18
4.1.1.4.1.1.	Reducción distancia LED-fibra	18
4.1.1.4.1.2.	Gel adaptador de índice.	19
4.1.2.	Uso de estructura tipo taper para acoplamiento de luz	20
4.1.2.1.	Análisis básico	20
4.1.2.2.	Procedimiento de fabricación del taper	20
4.1.2.3.	Primeros resultados experimentales y discusión de los mismos	21
4.1.2.3.1.	Cambiar modo de fabricación	22
4.1.2.3.2.	Zona de estabilización de entrada y salida	23
4.1.2.3.3.	Simulaciones	23
4.1.2.3.3.1.	Discusión de resultados obtenidos.	26
4.1.2.4.	Segundos resultados experimentales y discusión de los mismos	27

4.1.2.4.1.	Paredes lineales.	27
4.1.2.5.	Conclusiones y decisiones tomadas	28
4.1.3.	Uso de Splitter para acoplamiento de luz	29
4.1.3.1.	Definición	29
4.1.3.2.	Análisis básico	29
4.1.3.3.	Selección del splitter	30
4.1.3.3.1.	Splitter 1 x 2	30
4.1.3.3.2.	Splitter 1 x 7	31
4.1.3.4.	Resultados obtenidos.	33
4.1.4.	Montaje basado en lentes	34
4.1.4.1.	Fundamento teórico	34
4.1.4.2.	Selección de lente	35
4.1.4.3.	Resultados obtenidos y discusión de los mismos	35
4.1.4.4.	Conclusiones y Decisiones tomadas	37
4.2.	Diseño Electrónico. Driver LED.	39
4.2.1.	Características a cumplir	39
4.2.2.	Tipología de fuente de corriente a usar.	39
4.2.2.1.	Driver conmutado	39
4.2.2.2.	Driver lineal	39
4.2.2.3.	Tendencia del mercado	40
4.2.3.	Tipología de montaje seleccionado	40
4.2.4.	Diseño Realizado	40
4.2.4.1.	Aspectos críticos realizados en el diseño	42
4.2.5.	Resultados obtenidos	43
5.	Presupuesto total	46
6.	Resultados. Comparación con la competencia	48
7.	Bibliografía	51

Un proyecto, si bien está encaminado a lograr unos objetivos, unos resultados finales, siempre partirá de un punto inicial, un comienzo.

Y es en este punto donde comenzará la memoria de este proyecto, la creación de una fuente de luz blanca acoplada a fibra con tecnología LED. Como punto inicial se contextualizará el proyecto respondiendo a preguntas básicas como qué es, para qué se usa, el porqué de este desarrollo etc., Para servir como referencia inicial, a pesar de que ello no aporte conocimiento nuevo alguno a la persona con competencias en la materia.

Después se definirán el objeto y el alcance del proyecto, a lo cual seguirá una explicación a grandes rasgos de las diferentes tecnologías existentes en fuentes de luz acopladas a fibra, pudiéndose hacer a continuación un análisis de cuáles son los pros y contras de cada una, con el fin de poder lograr minimizar las debilidades y potenciar las fortalezas que debería a tener a priori la fuente que se desarrollará en este proyecto, para lograr, no solamente un dispositivo para usar de manera interna en la Universidad Pública de Navarra, ni tampoco equipararlo a los dispositivos que existen actualmente en el mercado, sino que se consiga crear la mejor fuente de luz blanca con tecnología LED existente en la actualidad.

Para tratar de lograrlo, se pasará a definir unos objetivos de carácter técnico que deberán llevarse a cabo para conseguirlo.

Tras esto, se pasará a la parte más ingenieril, la parte del diseño técnico, en donde se explicará cómo se ha llevado a cabo el dispositivo. También se tratarán los diferentes caminos por los cuales se intentaron abordar y conseguir los objetivos marcados, y las razones por las cuales no se consiguió. Todo ello estará complementado con los diferentes datos, valores y gráficos conseguidos.

Para finalizar, se analizarán las diferentes características y aspectos, los cuales son fundamentales para las fuentes de luz acopladas a fibra LED que existen, con el fin de poder situar la fuente diseñada frente a otras fuentes presentes en la actualidad.

# 1. Introducción

---

## 1.1. Fuente de luz blanca LED acoplada a fibra

### ¿Qué es una fuente de luz blanca acoplada a fibra?

Una fuente de luz acoplada a fibra se entiende como aquel dispositivo emisor de luz el cual está pensado con el fin de lograr incidir la mayor cantidad de luz posible sobre la entrada de la fibra óptica. El hecho de que sea blanco responde a que se busca un espectro de emisión lo más completo en el rango de ondas visibles comprendido en el tramo de 400nm - 700nm.

Este proyecto trata sobre el diseño de una fuente de luz blanca acoplada a fibra basada en tecnología LED ubicada en el rango del espectro visible, lo cual contará con ciertas ventajas y desventajas frente al resto de tipos de fuentes de luz.

### ¿Qué aplicaciones y usos tiene?

El uso más habitual de una fuente de luz blanca acoplada a fibra suele ser en aplicaciones de sensores de fibra óptica por su característica espectral, el cual le permite cubrir el rango visible usado ampliamente en aplicaciones de sensores. Esta aplicación le obliga a tener características específicas además del espectro blanco, como puede ser que debe tener la potencia suficiente debido a las pérdidas que se generan en el paso por el sensor. También debe ser estable tanto en periodos largos como en tramos cortos de tiempo, para aportar precisión y fiabilidad a las medidas que pudieran hacerse.

Con todo ello, las fuentes de luz acopladas a fibras se encontrarán en laboratorios ópticos y de sensores.

### ¿Por qué desarrollar este dispositivo?

El desarrollo de este equipo se realiza en el contexto del laboratorio de sensores de la Universidad Pública de Navarra, en donde tras el uso exhaustivo de estos equipos se intuye que existe una oportunidad en cuanto a que, a priori, el desarrollo no parece técnicamente muy complicado, y que a tenor de los precios actuales existe mucho margen de mejora. Con todo ello se piensa que existe la posibilidad de usar este dispositivo como una manera de entrar en el mercado de la instrumentación para laboratorio óptico.

## 2. Objeto y alcance del proyecto

---

Con todo lo mencionado anteriormente se establece el proyecto del diseño y creación de una fuente de luz blanca acoplada a fibra usando tecnología LED, la cual se tratará que alcance los siguientes objetivos marcados.

1. En un primer lugar, el objetivo más básico del proyecto tratará de satisfacer las necesidades básicas exigibles a una fuente de luz blanca tipo LED por parte de los usuarios del laboratorio de sensores de la Universidad Pública de Navarra.
2. El siguiente objetivo a alcanzar será el de lograr un equipo que no solamente logre satisfacer las necesidades más básicas por parte de los usuarios del laboratorio, sino lograr hacer una fuente de luz que logre alcanzar las características técnicas de una fuente existente en el mercado.
3. En el caso de lograr los puntos anteriormente marcados, se tratará alcanzar el más ambicioso de los objetivos, lograr crear una fuente de luz que supere al resto de las fuentes de luz blancas acopladas a fibra existentes, de tal manera que se pueda situar la fuente creada como la mejor fuente de luz blanca acoplada a fibra existente.

## 3. Tipos de fuente de luz blancas

---

En este punto se pasará a repasar de manera breve los diferentes tipos de fuentes de luz acopladas existentes.

### 3.1. Halógena

Constituye la fuente de luz con más ancho espectral de las fuentes de luz blancas disponibles en el visible, la cual trabaja en un rango de 400nm-1500nm. La potencia total de esta fuente es bastante alta debido al ancho del espectro, pero no alcanza valores altos de  $\mu\text{W}/\text{nm}$ .

La mayoría de las fuentes halógenas tienen como problema la falta de estabilidad en  $\lambda$  y en potencia.

Un precio aproximado sería 1200€.



Ilustración 1: Fuente de luz blanca halógena de 100W de la casa bentham (1)

### 3.2. Lámparas de descarga. Deuterio y Xenón.

La principal ventaja que tienen estas fuentes de luz es su presencia en el UV. Cuentan con un espectro que estará lleno de diferentes picos e irregularidades.

Es común ver fuentes de luz combinadas de deuterio y halógena para lograr una fuente con presencia en UV-VIS-NIR.

El precio suele ser mayor que en el caso de las lámparas halógenas

### 3.3. Láser.

Existen diferentes fuentes de tipo láser como pueden ser aquellas basadas en fenómenos de Fabry-Perot o DFB. Estas son las fuentes más potentes que se pueden encontrar en el espectro, y son

ampliamente usadas para aplicaciones en longitudes de ondas del infrarrojo que requieran de tiempos de conmutación pequeños, o potencias altas en zonas estrechas.

### 3.3.1. Fuente de luz láser con fibra dopada mediante fósforo

Este desarrollo es, en opinión del autor uno de los mayores desarrollos a futuro existentes en el sector de fuentes de luz blanca en el visible.

Su funcionamiento se basa en un láser de 450 nm, que se acoplará en una fibra la cual estará dopada con fosforo, lo cual en teoría hará que se genere un espectro de emisión como el de un LED blanco. De esta manera se unen las ventajas de las fuentes de luz basadas en laser, las cuales tienen una potencia mayor que cualquier otra fuente, con la distribución espectral de un LED blanco.



Ilustración 2: Fuente de luz láser blanca mediante fibra dopada con fosforo. Laser dopado (2).

Aunque como se ha mencionado, todavía no es una fuente de luz comercial, el concepto con el cual trabaja tiene las características de una gran fuente comercial.

### 3.4. LED.

Al ser este tipo de fuentes las que se estudiará en este proyecto, se aportarán datos del mismo en siguientes puntos de este proyecto.

Las características principales son que cuentan con un espectro con valores  $\mu\text{W}/\text{nm}$  altos, pero con distribuciones en espectro que suelen ir de 100nm para las fuentes monocromáticas, 300nm para fuentes blancas. Tiene la posibilidad de personalizar el espectro asignando los LEDs correspondientes, dando opciones de configuraciones multi-LED.

## 4. Diseño Técnico

---

En los siguientes puntos se tratará las diferentes maneras con las cuales se ha tratado la parte del acoplamiento de luz de la fuente diseñada. El orden en el cual están expuestos no corresponde con el orden cronológico correspondiente en el desarrollo del proyecto.

### 4.1. Acoplamiento de luz

#### 4.1.1. Butt-Coupling

##### 4.1.1.1. Fundamento teórico

El método de acoplamiento de luz del butt-coupling es aquel en el cual el emisor de luz se sitúa directamente sobre la entrada de la fibra óptica. El cálculo del acoplamiento capaz de alcanzar se puede hacer con una aproximación geométrica (3), la cual es bastante sencilla de hacer.

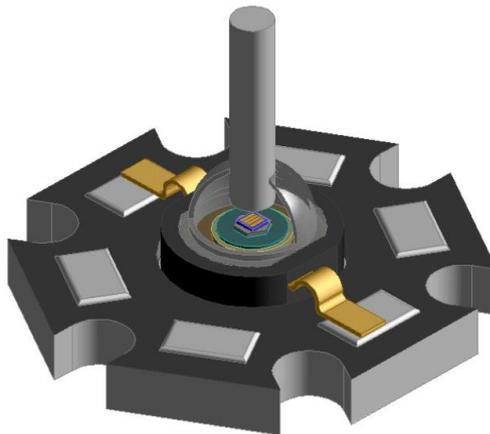


Ilustración 3: Configuración típica de butt-coupling

De esta manera, se define la eficacia del acoplamiento como la relación entre la potencia lumínica emitida por el emisor, en este caso LED, y la potencia de luz acoplada a la fibra, la cual será el resultado del producto de la eficacia relativa a la geometría, de Fresnel y de la disposición angular. Esto se puede expresar mediante la siguiente fórmula.

$$\alpha = \frac{P_{acoplada}}{P_{LED}} = \alpha_{geo} * \alpha_{fres} * \alpha_{ang}$$

##### 4.1.1.1.1. Pérdidas geométricas

Las pérdidas de carácter geométrico están relacionadas con la diferencia que puede existir entre las áreas de la superficie emisora (LED) y la superficie receptora (fibra). De esta manera, al

poner directamente una superficie frente a la otra como dicta el butt-coupling, se puede entender intuitivamente que la luz emitida por el área correspondiente a la sección que no esté en contacto con la fibra no será acoplada.

Con este criterio se pueden dar dos casos diferentes, que el área de la fibra sea mayor que el área del LED ( $A_{fib} > A_{LED}$ ), o que el área del LED sea mayor que el área de la fibra ( $A_{fib} < A_{LED}$ ).

1.  $A_{fib} > A_{LED}$ . En este caso, la eficacia geométrica será  $\alpha_{geo} = 1$  debido a que toda la luz que emita el LED incidirá contra la superficie de la fibra
2.  $A_{fib} < A_{LED}$ . En este caso, la eficacia geométrica de acoplamiento de área será la relación entre el área de la fibra y el área de emisión. Suponiendo que el LED es una superficie cuadrada un longitud de un lado de  $l$  y la fibra una superficie circular de radio  $r$  la relación se expresa de la siguiente manera.

$$\alpha_{geo} = \frac{\pi * r^2}{l^2}$$

Este es el caso más común, siendo un área típica para un LED de alta potencia de  $1\text{mm}^2$ .

#### 4.1.1.1.2. Pérdidas de Fresnel

Las pérdidas de Fresnel son aquellas que suceden cuando la luz incide en una superficie, por la cual se transmitirá parte de la luz y se reflejará parcialmente. La proporción de luz transmitida y reflejada dependerá mayormente en la polarización de la luz y del ángulo de incidencia. Aunque no es de ninguna manera hacer un desarrollo teórico el propósito de este proyecto, es conveniente saber la existencia de este tipo de pérdidas, que dependerá en gran medida del índice de refracción de la fibra. (3)

$$R = \frac{(n_{fib} - 1)^2}{(n_{fib} + 1)^2}$$

$$\alpha_{fres} = 1 - R$$

#### 4.1.1.1.3. Pérdidas angulares

Para las pérdidas por la disposición angular que existen en el sistema, estará limitada por el valor de la apertura numérica de fibra, así como del ángulo de emisión que tenga el LED en cuestión.

De esta manera, la ecuación que nos indicará la eficacia del acople por este criterio será la siguiente.

$$\alpha_{ang} = 1 - (\cos\theta_{fib})^{m+1}$$

Siendo  $m=1$  cuando se trate de un LED con un perfil de emisión lambertiano ( $120^\circ$ ), con lo que se igualará la ecuación a la siguiente expresión.

$$\alpha_{ang} = 1 - (\cos\theta_{fib})^2 = (\sin\theta_{fib})^2 = NA^2$$

#### 4.1.1.2. Análisis básico

De las ecuaciones mostradas en el apartado de fundamentos teóricos se puede extraer la siguiente conclusión: La correcta selección del LED a usar es crítica, ya que al carecer de más elementos, el LED y encontrar el modo correcto de calibrarlo parece que son los únicos aspectos a tener en cuenta.

De esta manera analizamos la expresión de la potencia acoplada por un LED de emisión lambertiana  $P_{acoplada} = P_{LED} * NA^2 * \frac{\pi * r^2}{l^2} * \frac{(n_{fib}-1)^2}{(n_{fib}+1)^2}$ , donde se puede ver que los parámetros en los que se debe hacer hincapié en la elección del LED son tanto la potencia total como el área, y más concretamente el parámetro  $\frac{P_{LED}}{A_{LED}}$ . Por otro lado, y aunque es externo a la fuente de luz, se puede ver que la potencia acoplada aumentará linealmente con el área de la fibra, y al cuadrado con la apertura numérica de la fibra.

Un ejemplo del acoplamiento teórico mediante el método del butt-coupling, usando un LED de alta potencia de 1x1mm de área a una fibra de 200um y  $NA=0.22$ , tendrá una eficacia de 0.12%. Si este LED tiene una potencia de 500 mW, lo cual entra dentro de lo posible, se podrá acoplar 0.6mW

#### 4.1.1.3. Selección del LED

Como se ha visto en apartados anteriores, debido a la ausencia de elementos extras en montajes basados en butt-coupling, la selección del LED es vital para alcanzar los objetivos deseados en cuanto a potencia lumínica. El LED en este proyecto se puede considerar como el eje principal, y es por ello que se han dedicado gran parte de los esfuerzos con el fin de lograr encontrar el mejor LED posible.

##### 4.1.1.3.1. Características a buscar en el LED

Anteriormente se ha mencionado como la característica importante a encontrar en un LED ser la relación  $\frac{P_{LED}}{A_{LED}}$ . Sin embargo, aunque ha priori puede parecer algo sencillo, la búsqueda ha resultado de las partes más difícil de este proyecto.

El porqué de esta dificultad tiene diferentes causas. La realidad es que los LED de alta potencia blancos están pensado para iluminación general, y no para el uso con la fibra óptica, con lo que generalmente la información relativa a los mismos, en muchas ocasiones se suele proporcionar según su punto de operación más eficiente en cuanto a su relación potencia consumo. Este punto no

es el mismo que el punto de máxima potencia, el cual es menos eficiente desde un punto de vista energético.

La pregunta ahora es, cual es el parámetro que hay que buscar para saber si un LED es un posible candidato a ser usado en la fuente de luz? Un LED tendrá el punto de potencia máximo en el mismo punto de corriente máxima. Con lo que el primer parámetro a mirar en un LED será la corriente máxima que puede soportar.

También se deberá ver si el LED es de un único chip o si es multichip. En el caso de los multichip se consiguen mayores potencias gracias a aumentar la superficie emisora con varios LED, con lo que la relación  $\frac{P_{LED}}{A_{LED}}$  es inferior a la correspondiente de un único chip. En los LED multichip se suelen posicionar en serie, con lo que son componentes que deberán funcionar a tensiones mayores. Como regla general se puede establecer que los LED de alta potencia de un único chip tendrán tensiones de funcionamiento inferiores a 4V. Por ello, se filtrarán este tipo de LED mirando tanto la tensión de funcionamiento como su forma en imágenes.

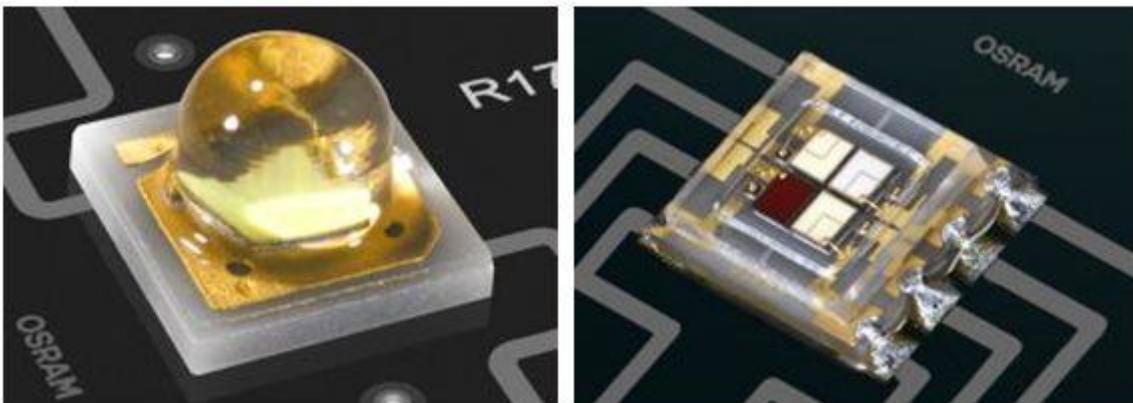


Ilustración 4: LED single-chip vs multi-chip

Otro de los aspectos que ha hecho la búsqueda del LED complicada ha sido el hecho de la gran cantidad de LEDs de alta potencia existentes en la actualidad, lo cual dificulta la búsqueda en gran medida. A continuación se muestran los resultados de búsqueda de un distribuidor habitual de electrónica, en los cuales llegan a salir hasta 20000 resultados bajo el criterio de búsqueda de LED de alta potencia blanco.

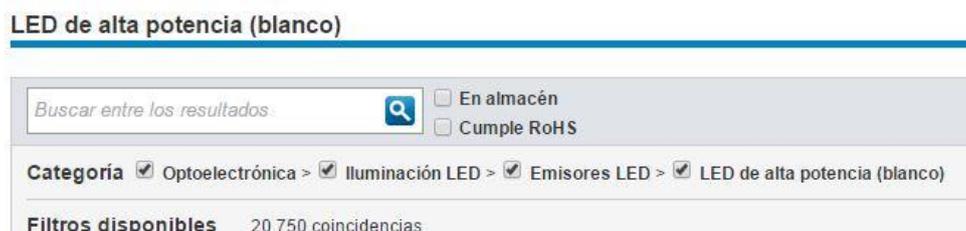


Ilustración 5: Ejemplo de la gran cantidad de resultados mostrados en LED de alta potencia blancos

Esto, sumado al hecho de que la búsqueda no se puede automatizar correctamente, ha supuesto unos grandes contratiempos.

#### 4.1.1.3.2. LED escogido

Finalmente, tras varias iteraciones en la búsqueda del LED correcto, y tras 3 intentos, se consigue encontrar el LED el cual se usará en el diseño.

El modelo es el LED blanco de alta potencia OSOLON SQUARE. Es un LED fabricado por la empresa OSRAM, la cual se sitúa como una de las empresas líderes en el sector de la iluminación LED a nivel mundial.



Ilustración 6: LED oslon square

Es, en base a toda la búsqueda realizada en este proyecto, el LED de un único chip de tamaño inferior a 3 x 3mm que más potencia lumínica es capaz de suministrar, pudiendo llegar a alcanzar hasta los 600 lúmenes de potencia. Esto es debido a la gran cantidad de corriente que soporta, hasta 1800 mA, y a la buena eficiencia eléctrica que tiene. Todo ello le reporta una relación  $\frac{P_{LED}}{A_{LED}}$  muy elevada, que era la característica buscada.

Color Temperature Farbtemperatur	Luminous Flux 1) page 26 Lichtstrom 1) Seite 26 $I_F = 700 \text{ mA}$ , $T_S = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Phi_V$ [lm]
[K]	
3000	224 ... 280
3500	240 ... 304
4000	240 ... 304
4500	240 ... 304
5000	240 ... 304
5700	240 ... 330
6500	240 ... 330

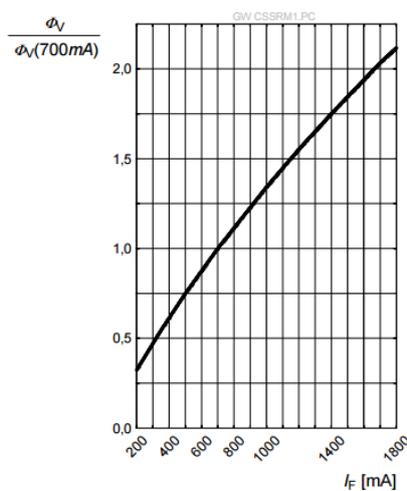


Ilustración 7: Potencia de cada tipo de blanco y relación potencia/corriente (4)

Además, tiene un precio muy competitivo, estando disponibles por menos de 2 € casi todas las longitudes de ondas, encontrándose disponible en la mayoría de distribuidores más habituales de electrónica.

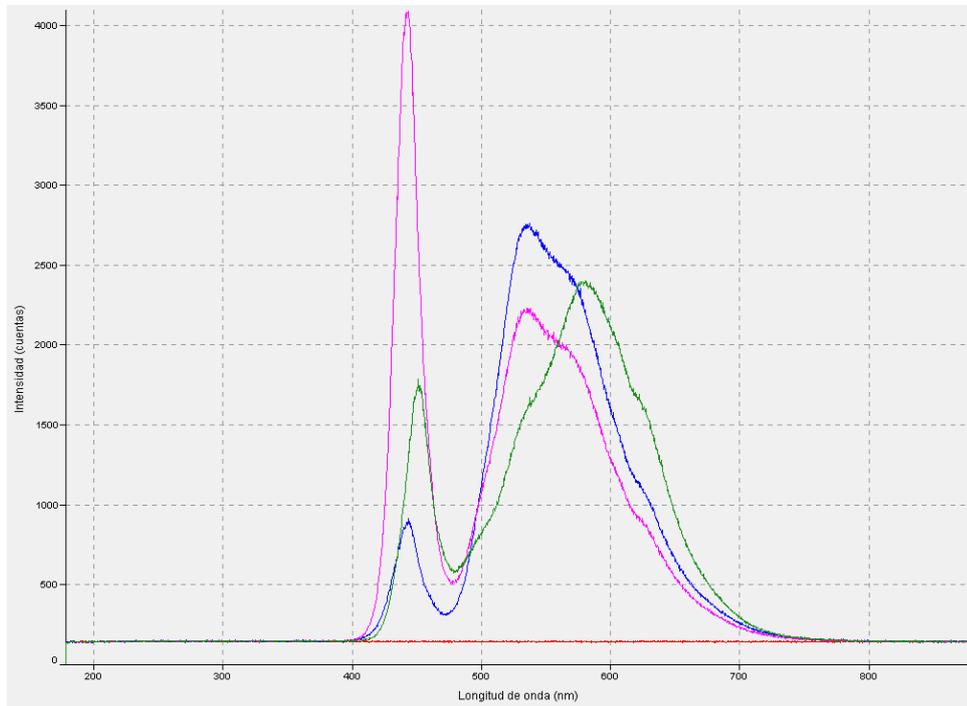


Ilustración 8: Diferentes tipos de blanco del LED oslon square

A esto se le suma el hecho de que cuenta con PCB metálicos de alta conductividad, MCPCB (metal-core printed circuit board), los cuales se pueden adquirir por precios inferiores a 2 €.

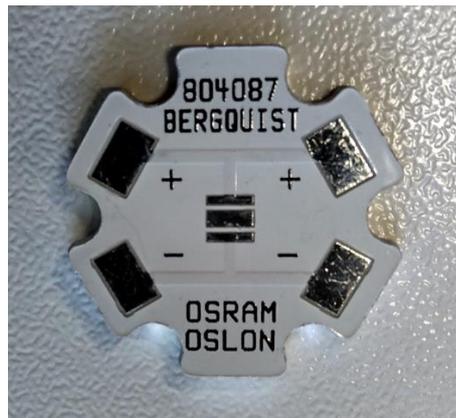


Ilustración 9: MCPCB para LED oslon square

#### 4.1.1.4. Resultados obtenidos

Tras realizar el montaje pertinente, se pasa a medir los resultados obtenidos. Se comenzará midiendo la potencia absoluta de la fuente de luz, por considerarse como el parámetro más importante.

La medición de la potencia se hará mediante el uso de un espectrómetro y una fuente calibrada (hl-2000-cal).

Tras lograr los espectros correspondientes, se tratan los datos y se consigue el espectro real del LED, representado en el gráfico siguiente.

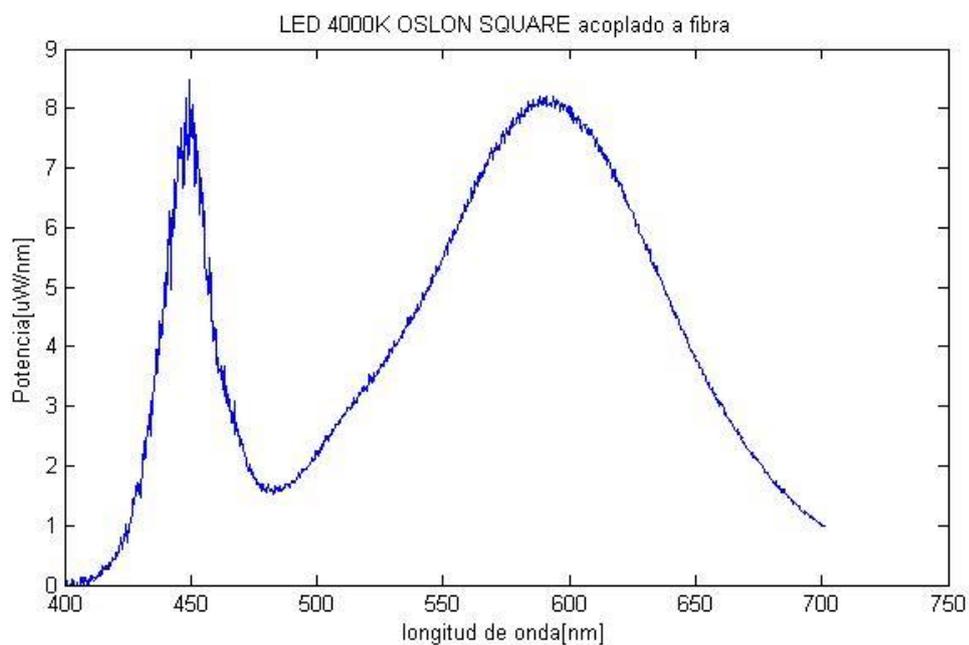


Ilustración 10: Espectro del LED OSOLON SQUARE después de calibración de espectrómetro

Para conseguir la potencia total acoplada en el visible (400nm-700nm) se integrará el área bajo la curva del espectro, logrando así una potencia total de 1.22mW para una fibra de 200  $\mu\text{m}$  y 0.22 de apertura numérica.

Dado los buenos resultados que suponen estas mediciones, se adoptara para el diseño final de la fuente de luz.

#### 4.1.1.4.1. Posibles mejoras

##### 4.1.1.4.1.1. Reducción distancia LED-fibra

Como se ha visto en los fundamentos teóricos del butt-coupling, la posición del LED debe estar directamente sobre la superficie de la fibra para conseguir un óptimo resultado.

Aunque en el montaje realizado se puso el componente LED sobre la fibra óptica, existe una distancia entre el chip del LED y la superficie de la fibra, la cual está generada por la lente incorporada en el LED.

Esta distancia es de menos de un cm, pero ya es suficiente como para que gran parte de la luz emitida por el LED no se acople en la fibra.

Para solucionar esto, se cortó la lente del LED, la cual era de resina de silicona, para acortar la distancia al máximo posible entre LED y fibra.

Al ser un LED blanco, el cual usa un recubrimiento de fósforo sobre un LED emisor en 455 nm, no se puede quitar completamente la lente, ya que la capa de fosforo se queda adherida a la lente, y se pierde la distribución espectral blanca. Esto no supone ningún problema en la mayoría de los LED monocromáticos a los cuales se les puede extraer completamente la lente.

Se pasa entonces a realizar pruebas experimentales en cuanto a mejora del acoplamiento. El experimento realizado es de la siguiente manera.

Se mide la potencia acoplada por un LED blanco oslon square sin manipular, tras lo cual se pasara a extraer la mayor parte posible de la lente para reducir la distancia al máximo, y se volverá a hacer la misma medición.

Como se puede ver en el siguiente gráfico, se incrementa el acople de potencia en un 20%.

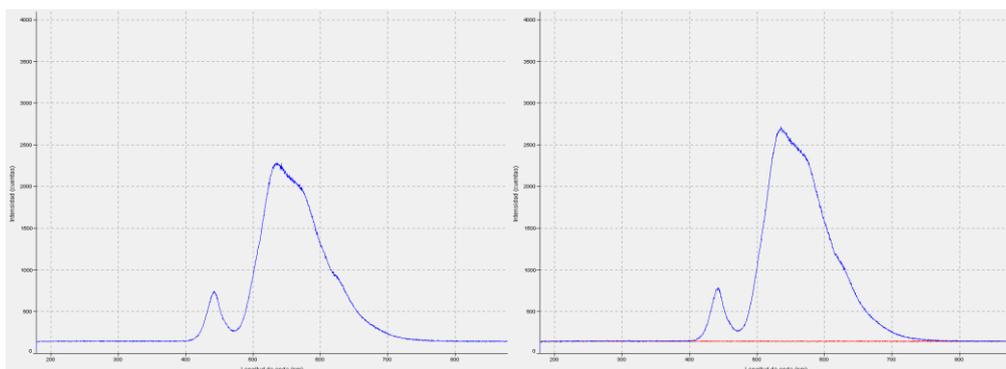


Ilustración 11: Comparación espectros LED con lente y lente extraída

Se realiza el mismo experimento con un LED de 455nm, al cual se le extrae completamente la lente, consiguiendo una mejora del acoplamiento del 100%.

Pese a los buenos resultados, no se incluye esta técnica en el diseño final, debido a que se entiende que para implantarlo en un diseño, debería primero de ser sometida a pruebas de funcionamiento para comprobar su fiabilidad, ya que es posible que el LED sufra condiciones más duras para su funcionamiento tras la extracción.

#### 4.1.1.4.1.2. Gel adaptador de índice.

Como se ha visto en la parte de fundamentos teóricos, existen ciertas pérdidas debido a las reflexiones de Fresnel, por a la desigualdad de índices.

Aunque este tipo de pérdidas son, en principio, las menores, e incluso se suelen despreciar, siempre suponen una pérdida de acople. Para solucionarlo, se propone el sencillo remedio de usar gel adaptador de índice en la entrada de la fibra. Esto deberá ser llevado a cabo por el usuario de la fuente de luz, con lo que en el diseño no afecta en nada.

Sin embargo, debería comprobarse que el gel adaptador de índice no genera ningún problema por causas como la degradación por el tiempo o la temperatura.

## 4.1.2. Uso de estructura tipo taper para acoplamiento de luz

Tras unos malos resultados iniciales en los primeros montajes con butt-coupling se plantea la posibilidad de usar una fibra con estructura tipo taper con el fin de conseguir un buen acople de la fibra.

### 4.1.2.1. Análisis básico

Como se ha visto en el apartado del butt-coupling, el acoplamiento que se podrá conseguir en la fibra (despreciando las pérdidas de Fresnel) es  $P_{acoplada} = P_{LED} * NA^2 * \frac{A_{fib}}{A_{LED}}$ . La idea es posicionar una fibra, la cual tendrá de entrada un área  $A_{fib,ent}$  directamente sobre el LED mediante butt-coupling, con lo que la potencia acoplada será la correspondiente a un área  $A_{fib,ent}$ . A continuación se hará una zona de estrechamiento o taper, en donde se reducirá el área de la fibra de  $A_{fib,ent}$  a  $A_{fib,sal}$ . En este punto es donde llega la parte donde llega la mejora, ya que si suponemos el taper adiabático, en el cual no habrá ningún tipo de pérdida, se logrará que salga por la fibra la misma cantidad de luz que la que ha entrado, aunque con una reducción de área de  $\frac{A_{fib,ent}}{A_{fib,sal}}$ , lo cual se corresponderá exactamente con el aumento de la potencia acoplada debido al aumento del ratio  $\frac{P_{LED}}{A_{emisora}}$ .

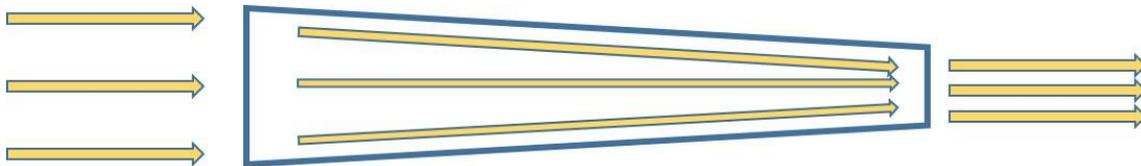


Ilustración 12: Esquema de funcionamiento de taper para acoplamiento de luz

De esta manera, por ejemplo si se hiciese un taper de una fibra de 200um hasta 50um, se conseguiría hasta un aumento teórico del 1600% en la capacidad de acople de luz para fibras de 50um

### 4.1.2.2. Procedimiento de fabricación del taper

Los tapers se fabricarán usando una máquina de dip coating de la empresa Nadetech, la cual sumergirá progresivamente una sección de fibra a una velocidad constante en una disolución de ácido fluorhídrico de 40%, con lo que supone que logrará un descenso del diámetro lineal lo más constante posible.

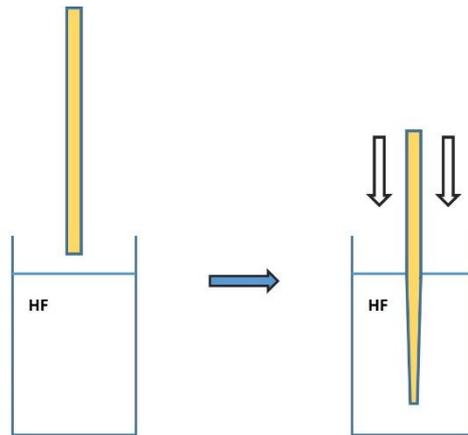


Ilustración 13: Esquema de fabricación

#### 4.1.2.3. *Primeros resultados experimentales y discusión de los mismos*

Se procede a fabricar diversos tapers mediante el proceso explicado anteriormente partiendo de una fibra de 1000  $\mu\text{m}$ , la cual se reducirá hasta 200  $\mu\text{m}$ .

Los primeros resultados obtenidos estarán muy por debajo de los esperados, siendo un 1% de los resultados teóricos esperados (esto se puede observar visualmente en las imágenes posteriores, ya que en el caso de no existir pérdidas en la zona del taper no se debería percibir la luz que sale por los laterales de la zona de estrechamiento). Es por ello que se trabaja en buscar explicaciones y soluciones a los malos resultados obtenidos, a lo que se llega a los siguientes puntos.



Ilustración 14: Uso de taper con LED ámbar

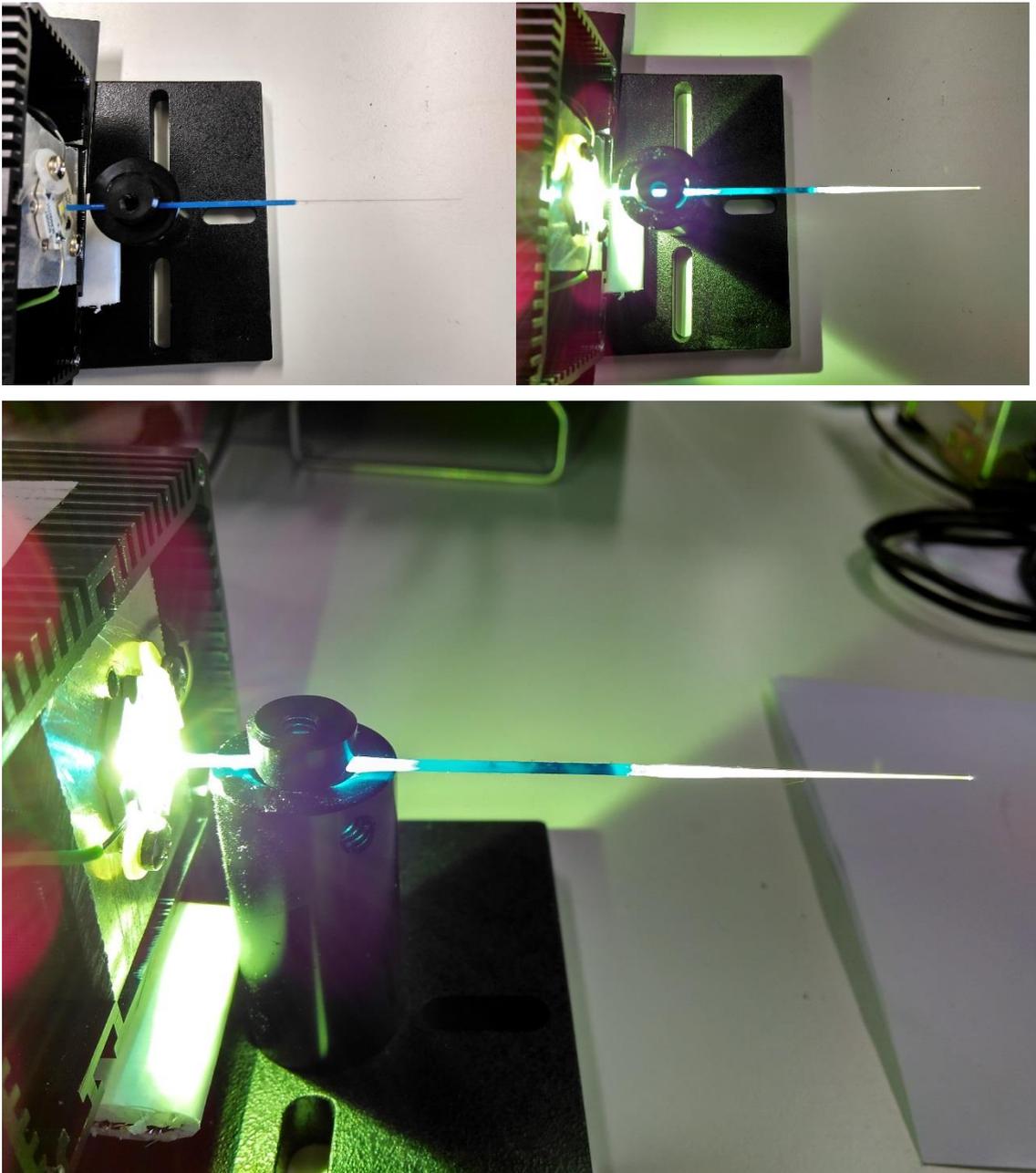


Ilustración 15: Uso de taper con LED blanco equalizado

#### 4.1.2.3.1. Cambiar modo de fabricación

Uno de los aspectos claves a la hora de hacer un taper adiabático es mantener las superficies del núcleo de la fibra sin irregularidades por las cuales existan pérdidas de potencia.

Durante la fabricación del taper, el método era hacer una introducción rápida en el HF, y hacer una salida lenta, a velocidades bajas. Sin embargo, al parecer, durante esta extracción el ácido fluorhídrico se quedaba sobre la superficie en pequeñas gotas, que seguían haciendo su acción durante más tiempo, lo que generaban imperfecciones en la superficie, haciendo a su vez un taper con muchas pérdidas.

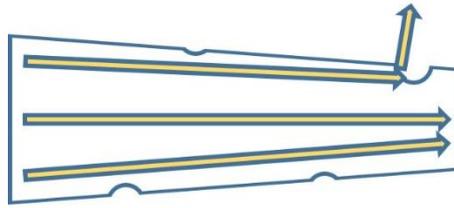


Ilustración 16: Pérdidas por imperfecciones en las paredes

Una vez detectado, el fallo, se invirtió el orden, haciendo un descenso constante y una subida rápida, con lo que se solventó este problema.

#### 4.1.2.3.2. Zona de estabilización de entrada y salida

Por la estructura que tiene un taper, si se posiciona justo cuando acaba el descenso del área la salida, la luz que salga tendrá un ángulo de salida mayor que en el caso que en la fibra normal. Esto es debido a que en la zona del taper la luz ha sufrido un cambio del ángulo de reflexión con la fibra, que si bien deberá ser menor que un parámetro ( $V(5)$ ) para asegurar la adiabaticidad (6), siempre hace que durante esta etapa a luz tenga un mayor ángulo.

Esto se soluciona añadiéndole una etapa donde la luz deberá volver a entrar en un régimen para salir con el ángulo menos pronunciado.

#### 4.1.2.3.3. Simulaciones

Debido a los problemas relativos a la evidente falta de adiabaticidad de los tapers generados, se simulan mediante un software dedicado a ello creado en el departamento de sensores de la UPNA por el doctor Ignacio del Villar, llamado tapersim, con el fin de poder ver si existe evidencia de algún fallo.

En los gráficos expuestos en la siguiente página se muestran las simulaciones para diferentes tapers, los cuales van de diámetros de fibra de 200um, 400um, 600um, 800um y 1000um a diámetros de salida de 125um, 200um y 400um.

El eje Y mostrará la longitud necesaria en mm que deberá tener la zona de estrechamiento del taper, y el eje X mostrará la longitud de onda para la cual se ha calculado la longitud del taper.

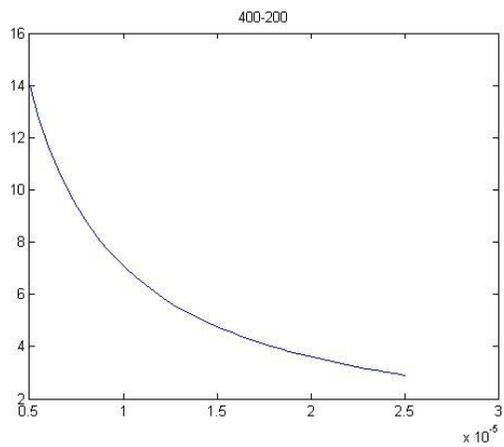
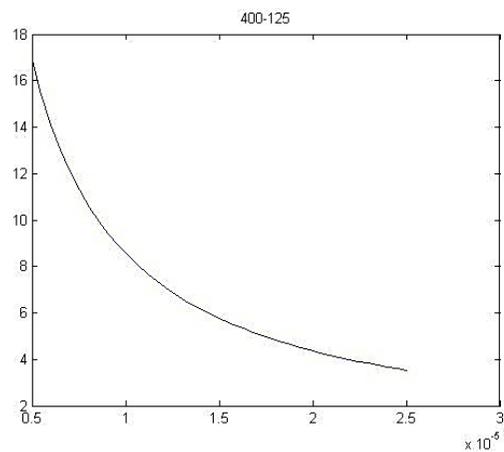


Ilustración 17: Simulaciones de taper de 400um-125um y 400um-200um, de izquierda a derecha

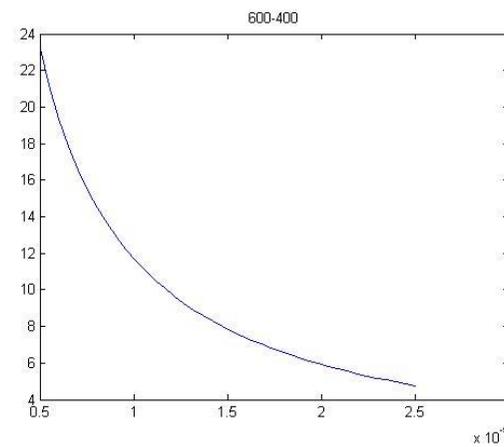
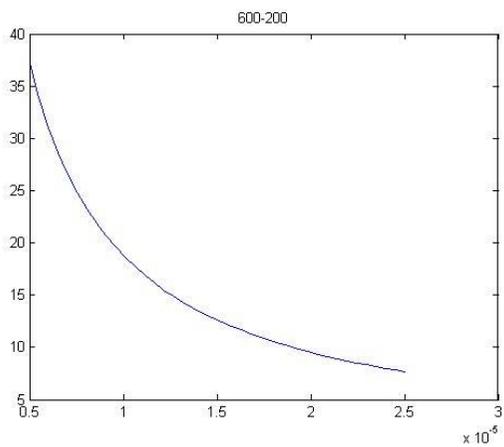
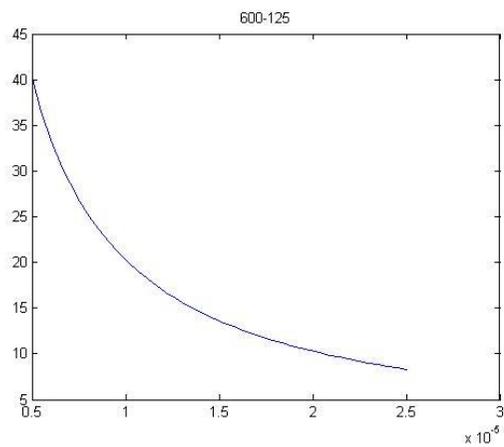


Ilustración 18: Simulaciones de taper de 600um-125um, 600um-200um, y 600um-400um, de izquierda a derecha

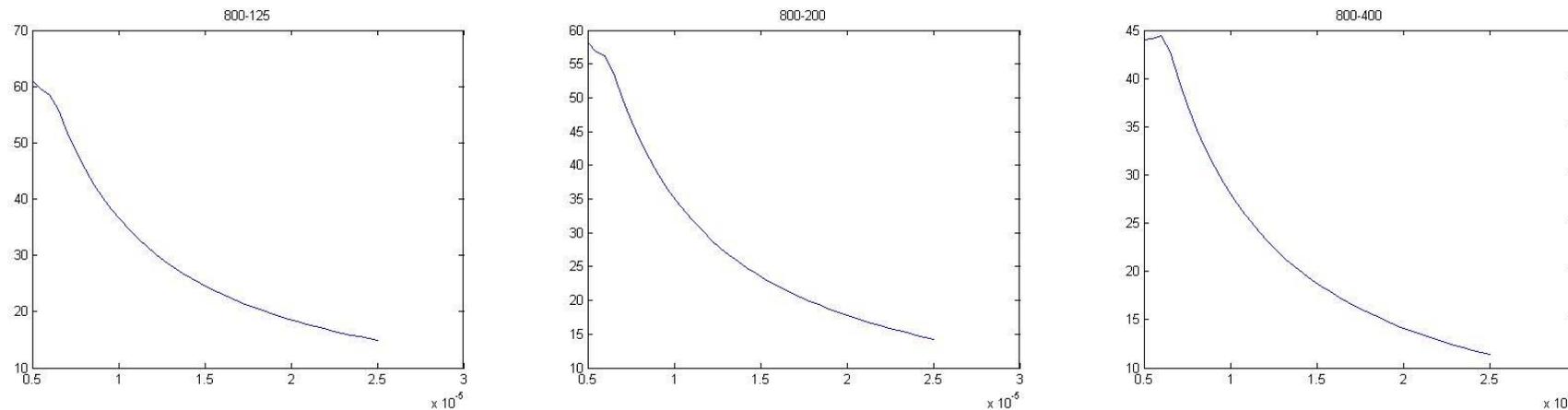


Ilustración 19: Simulaciones de taper de 800um-125um, 800um-200um y 800um-400um, de izquierda a derecha

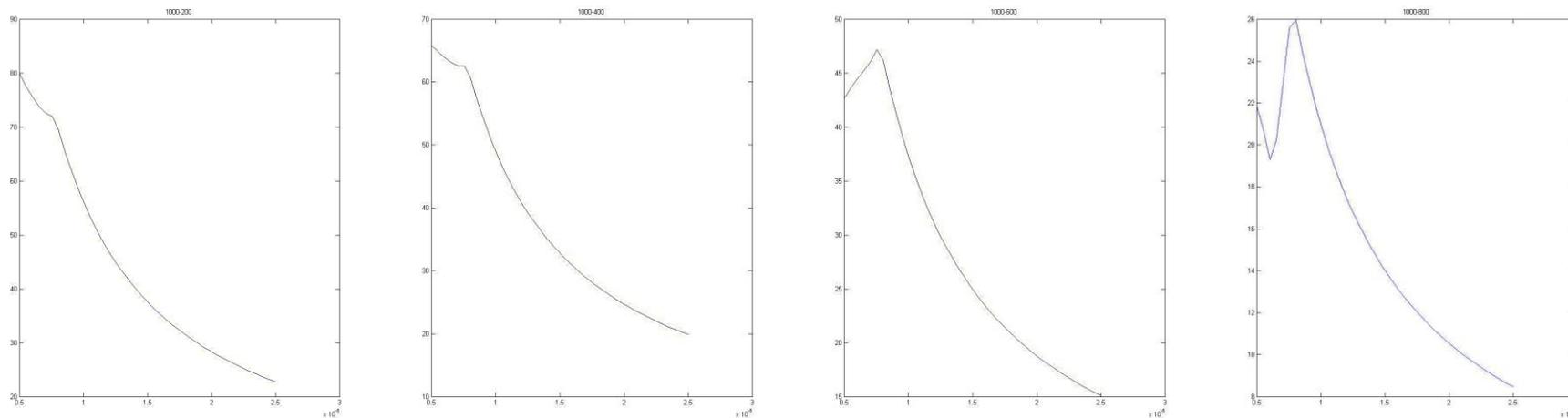


Ilustración 20: Simulaciones de taper de 1000um-200um, 1000um-400um, 1000um-600um y 1000um-800um, de izquierda a derecha

#### 4.1.2.3.3.1. *Discusión de resultados obtenidos.*

Tras las correspondientes simulaciones se obtienen los gráficos anteriores.

La zona en la cual se trabajará, las longitudes de ondas situadas en la parte del espectro visible (400 nm-700 nm) estará fuera de los límites del gráfico, ya que por las limitaciones del software solo nos muestra hasta 5um en el eje x. Sin embargo, solo habrá que extrapolar para lograr los datos específicos para la zona del visible.

También hay que remarcar que en varias simulaciones en las longitudes de onda más cortas se ha visto que el algoritmo de cálculo fallaba porque en el cálculo numérico no se lograba la convergencia de los resultados. Para lograr el valor exacto para las regiones de longitud de onda visibles se deberán prescindir de estos datos, y extrapolar según el resto de la curva conseguida.

Los anteriores inconvenientes de las simulaciones no resultan algo crítico, ya que lo que se quería era lograr un análisis cualitativo en los que se mostrase donde podían existir fallos, más que cuantitativo con resultados específicos.

De las simulaciones se sacan dos conclusiones principales:

1. Los tapers adiabáticos para diámetros grandes de fibra (600um, 800um, 1000um) resultarían en longitudes de taper inasumibles, llegando a longitudes aproximadas de 1 m para casos concretos.

La explicación teórica de este fenómeno se explica en base al trabajo “The shape of fiber taper” (6).

En este trabajo se da un método para calcular la longitud necesaria de un taper, el cual está representado por la siguiente ecuación.

$$z(r) = \frac{-2\pi}{f} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r(\beta_1 - \beta_2)}$$

Lo que ocurre explicado de una manera sencilla es que para los casos de diámetros de fibra grandes, la diferencia entre  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , que son los índices efectivos del modo fundamental y del segundo, disminuirá, lo cual aumentará la longitud necesaria para cumplir el criterio de adiabaticidad.

2. La longitud de onda para la que se diseña el taper es un parámetro crítico. Se puede ver que para las longitudes de ondas las cuales están situadas en el visible se requerirá longitudes de taper mayores que para el caso de longitudes de onda situadas en el infrarrojo.

#### 4.1.2.4. *Segundos resultados experimentales y discusión de los mismos*

Después de analizar el porqué del fracaso de los primeros intentos a la hora de fabricar la estructura de tipo taper para el acoplamiento de luz, se vuelven a fabricar diferentes tapers con los nuevos conocimientos adquiridos. Para ello se fabricarán tapers con una reducción de diámetro que irá desde 400  $\mu\text{m}$  hasta 200  $\mu\text{m}$ , con una zona de estrechamiento de una longitud de 8 cm.

Los resultados en este caso son notoriamente mejores que los anteriores, logrando tapers que alcanzan una eficacia de hasta un 50 %. Con este resultado, se estaría entrando en una mejora de la potencia acoplada teórica máxima de un 100% respecto al butt coupling, ya que la disminución de áreas es de una proporción de 4, con lo que multiplicado por la eficiencia de 0.5, la multiplicación de las dos da 2.

Sin embargo, hay que analizar el porqué de la eficacia del taper, ya que aunque es verdad que respecto a los primeros resultados se ha conseguido un aumento de la eficacia muy significativa, sigue estando muy por debajo del 100% que se debería conseguir teóricamente si el taper fuese adiabático.

##### 4.1.2.4.1. *Paredes lineales.*

Por el método de fabricación, en el cual se va sumergiendo una sección de fibra de manera lineal en la disolución de ácido fluorhídrico a una velocidad lineal, da como resultado una disminución del diámetro lineal.

Para que un taper sea adiabático, tiene que satisfacer la condición de adiabaticidad. Sin entrar en aspectos teóricos, este criterio hace que durante la transición del taper existan diferentes ángulos en la fibra.

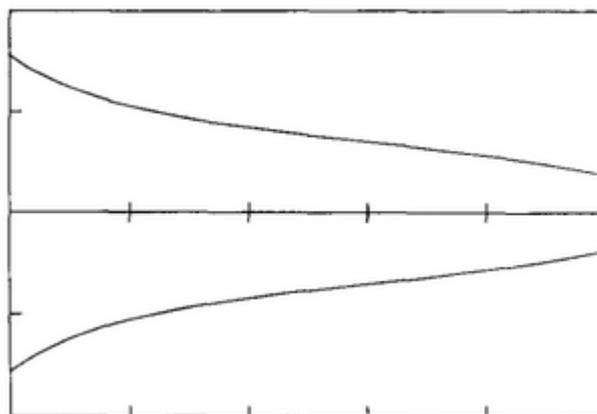


Ilustración 21: Ejemplo forma de taper adiabático (6)

La solución para ello sería hacer una inmersión a velocidad variable para lograr el mismo perfil que un taper ideal. Sin embargo, el equipo usado para la fabricación, solo cuenta con la

posibilidad de ajustar la velocidad en diferentes tramos, con lo que habría que dividirlo en el máximo de tramos para lograr asimilarlo al máximo a la curva que se debe crear teóricamente.

#### 4.1.2.5. Conclusiones y decisiones tomadas

La investigación realizada sobre el acoplamiento mediante estructuras de fibra tipo tapers muestra que existe la posibilidad de lograr mejoras en la potencia acoplada mediante su uso.

Su desarrollo práctico, puede producir, en opinión del autor, un dispositivo sujeto a patente que otorgaría un gran valor diferencial a la empresa que lo explotase en el nicho específico de fuentes de luz para el uso con fibras de tamaño reducido (menos de 200um).

En tal caso, lo primero se debería discutir si su desarrollo merece la pena, siendo la respuesta afirmativa para el autor.

Como reflexión en torno a esto, hay que pensar en dos puntos diferentes. La mayoría de fuentes de luz acopladas existentes, por la estructura interna que tienen, en las cuales la superficie emisora es mayor que la superficie de la fibra (exceptuando láseres y led superluminiscentes, los cuales tienen áreas de emisión muy pequeñas), el acoplamiento se va reduciendo drásticamente con el área de la fibra, sufriendo esto especialmente en fibras de tamaño reducido, con lo que con este posible dispositivo se conseguiría solventar en gran medida este problema.

También está el hecho de que es un desarrollo muy susceptible a usar para la integración en equipos superiores, en donde se podrían crear dispositivos que juntasen el LED de alta potencia y el taper para lograr hacer componentes parecidos a los SLD, de los que en la actualidad no se ha encontrado ninguno con un espectro blanco en el visible (400nm-700nm).

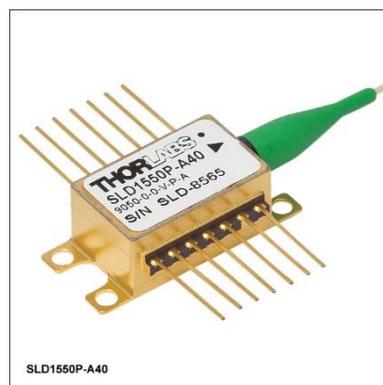


Ilustración 22: SLED de la compañía Thorlabs (7)

Respecto a su desarrollo dentro del proyecto, por sus limitaciones temporales y debido a que es un proyecto de corte pragmático y enfocado a objetivos, se decide abandonarlo temporalmente, ya que se requeriría de una mayor inversión de tiempo, sin tener los resultados 100% asegurados.

### 4.1.3. Uso de Splitter para acoplamiento de luz

#### 4.1.3.1. Definición

Se entiende como splitter aquel dispositivo óptico pasivo, el cual parte como varias entradas de fibra óptica que durante en el recorrido del mismo se juntan en la misma fibra, pero que mantendrá las mismas dimensiones que las de la entrada. Esta unión podrá ser hecho mediante diferentes procesos como puede ser, por ejemplo mediante fusión.

#### 4.1.3.2. Análisis básico

Como se ha visto en puntos anteriores, la ecuación que marcará la potencia acoplada a la fibra mediante el método de butt-coupling es  $P_{acoplada} = P_{LED} * NA^2 * \frac{A_{fib}}{A_{LED}}$ .

El objetivo en el caso del uso del splitter como estrategia para acoplar una mayor potencia lumínica y/o aumentar el ancho del espectro es la de asignarle un LED a cada entrada del splitter, el cual será posicionado en butt coupling, y la fibra donde se unen todas las entradas conectarla a la salida de la fuente de luz.

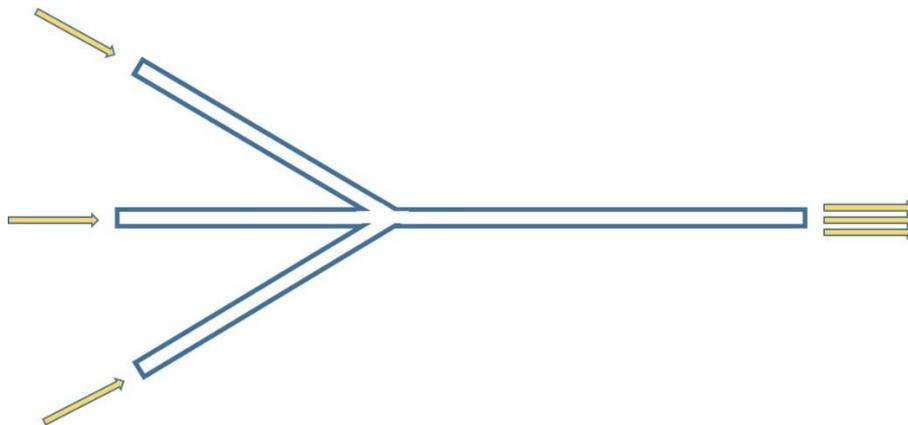


Ilustración 23: Esquema de splitter para acoplamiento de luz

De esta manera, en términos del espectro se podrá de ensanchar en función de los LED que se pongan. En términos de potencia, es como multiplicar la potencia acoplada por el número de LEDs que permita el splitter en cuestión.

Sin embargo, esto será para un caso ideal, en el cual no existan pérdidas en el splitter. En un análisis real se debe añadir las pérdidas que se generan en el splitter.

Es aquí donde se sitúa el verdadero problema, ya que estas pérdidas deben ser lo suficientemente pequeñas como para que siga habiendo una mejora de la potencia acoplada.

Para ello, se debe cumplir la siguiente condición, para un splitter de  $n$  entradas y 1 salida, con un coeficiente de pérdidas  $\rho$  para cada entrada del splitter, denominando la potencia acoplada por un LED en butt-coupling como  $P_{butt}$ .

$$P_{butt} < P_{butt} * n * \rho$$

En el caso de que se cumpla la condición anterior nos indica que existirá aumento de la potencia acoplada mediante el uso del splitter.

#### 4.1.3.3. Selección del splitter

Como se ha podido ver en la sección anterior, la característica a buscar es que el producto de  $n * \rho$  sea lo mayor posible.

Sin embargo hay que puntualizar que el coste del sistema aumentará de una manera proporcional con  $n$ , ya que cada entrada debe contar con su correspondiente LED, lo que conlleva a su vez de su correspondiente pcb, transistor etc.

Para la selección del splitter también debe tenerse en cuenta que en el caso de fibras de diámetro grande (>600um) el diámetro de la fibra del splitter deberá ser mayor ya que si no se limitará la potencia de luz máxima que se pueda conseguir.

##### 4.1.3.3.1. Splitter 1 x 2

Uno de los splitters los cuales se usarán para validar las hipótesis sobre los splitters será uno de 1 x 2 de DieMount (8). Será un splitter de fibra de plástico de 1mm de diámetro.

Es un splitter en el cual las hojas de especificaciones marcan que tiene un parámetro de "excess loss" el cual sigue la siguiente formula.

$$EXCESS LOSS = 10 * \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

El valor de "EXCESS LOSS" es de 1.3dB, el cual da una relación de  $\frac{P_{out}}{P_{in}}=0.741$ . Teniendo en cuenta que es un splitter de 1 x 2, la potencia de entrada  $P_{in}$  será el equivalente a  $2P_{butt}$ , con lo que si lo multiplicamos por 0.741 sale que se acoplará  $1.48P_{butt}$ , lo que significa que se acoplará 48% más que en el caso de un solo LED en butt-coupling.

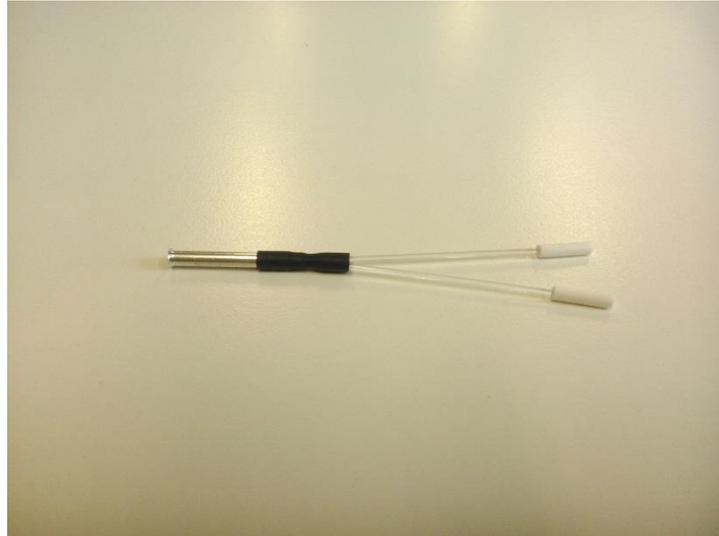


Ilustración 24: Splitter 1 x 2

Además, otro aspecto a favor de este splitter es su precio, ya que está disponible por 5€, lo cual viendo los precios que existen en el mercado, por lo general más de 60€, hace que sea un splitter muy competitivo, y a priori adecuado para el diseño de fuentes de luz de alta potencia.

#### 4.1.3.3.2. Splitter 1 x 7

También se validarán las hipótesis sobre los splitter mediante uno de 1 x 7. Aunque no existe una hoja de especificaciones como tal, se contacta con el fabricante para conocer sus características, y marca el parámetro de excess loss de 2-3 dB.

Se vuelven a repetir los cálculos para el caso más restrictivo de 3dB, lo que da una relación de  $\frac{P_{out}}{P_{in}}=0.5$ . Como el splitter es de 1 x 7, significa que el valor que se logrará será  $3.5P_{butt}$  lo que significa un aumento del 250% respecto al valor que se lograría solamente con un LED en modo butt-coupling.

Mientras que con el splitter anterior parece que su uso estaría más enfocado a lograr fuentes de luz con más potencia acoplada, este splitter podría estar enfocado a lograr un espectro más ancho. Para hacerse una idea, generalmente un LED monocromático cuenta con un ancho espectral de alrededor de 100nm, lo que mediante el uso de este splitter se podría conseguir un espectro de 700nm con un acople de potencia nunca antes visto para fuentes de luz de tipo LED en el visible.

El ejemplo del tipo de espectro que se conseguiría sería parecido a la siguiente imagen, correspondiente a la fuente de luz de Fiber-tech. Esta fuente cuenta con 5 led diferentes, pero aunque no dan el valor de potencia acoplada, se deduce que será un valor muy pequeño por su configuración.

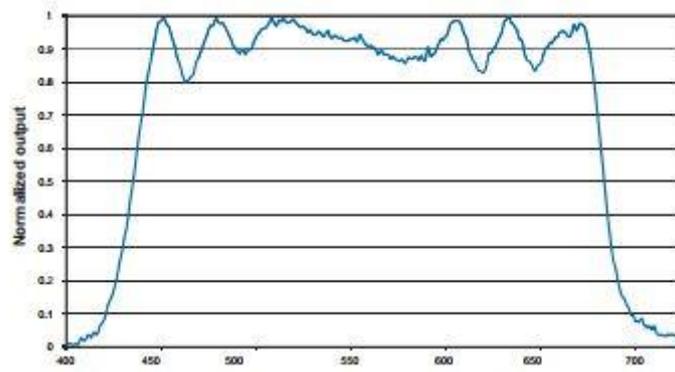


Ilustración 25: Espectro fuente multi-led fiber-tech (9)

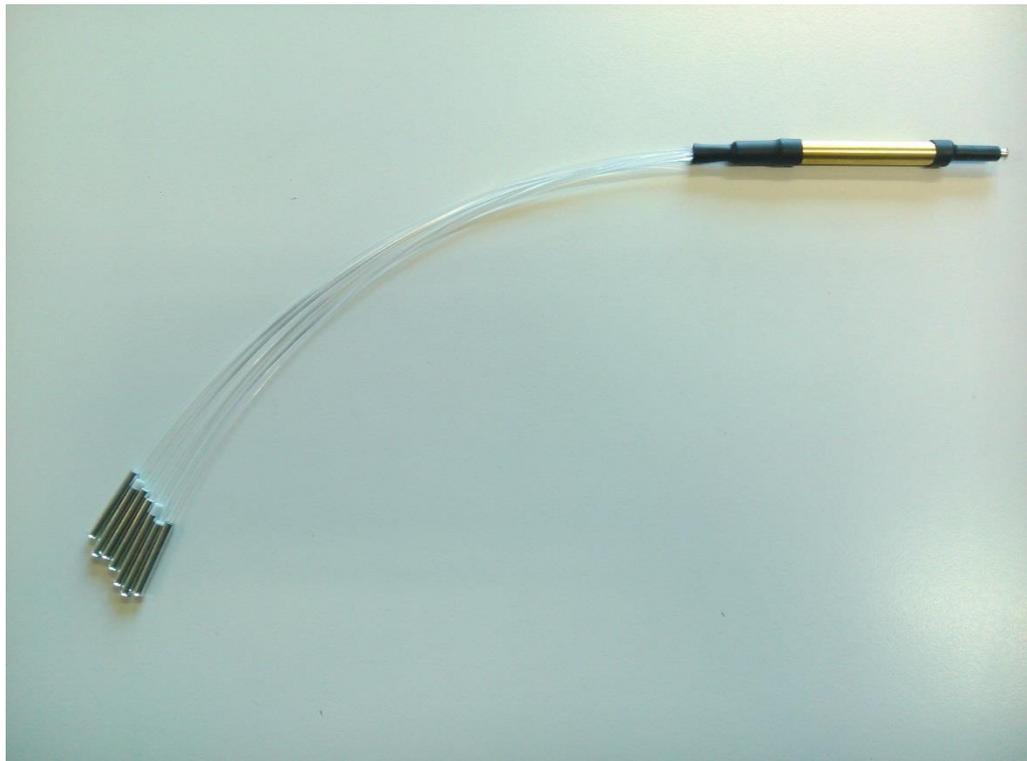


Ilustración 26: Splitter 1 x 7

Este Splitter está por un precio de 60€.

#### 4.1.3.4. *Resultados obtenidos.*

Se realiza el siguiente experimento para saber si las hipótesis realizadas se pueden pasar de la teoría a la práctica.

Se comienza midiendo mediante el fotodiodo de la marca ophir la potencia acoplada en la fibra mediante el esquema típico del butt-coupling. A continuación se posiciona el splitter 1 x 2 con una de las 2 entradas en el LED en butt-coupling, y la única salida directamente sobre la fibra. Se procede a volver a medir la potencia acoplada.

Los resultados muestran que la potencia acoplada a la fibra de esta manera es un 68% de la potencia que se consigue mediante el butt-coupling sin splitter, lo que es un valor muy cercano a la teoría (74%).

Para el valor obtenido, se concluye que se podría conseguir una mejora de la potencia acoplada cercana al 40%, con lo que se valida la hipótesis sugerida, y demuestra que se podría usar el acoplamiento mediante splitter como medio para conseguir fuentes con una mejor capacidad de acoplamiento de luz, así como con una mejor distribución espectral.

Debido a la fuerte restricción temporal en el momento de lograr estos resultados, no se pueden realizar pruebas ni realizar un montaje final con el método de los splitters.

#### 4.1.4. Montaje basado en lentes

##### 4.1.4.1. Fundamento teórico

La idea con un montaje basado en lentes es la de crear un sistema óptico situado entre el LED y la entrada de manera que confinen la luz a la fibra. Dentro de este montaje, existen diferentes posibilidades en función del tipo de lentes y cantidad que se use.

El objetivo de este montaje será el de mejorar el acoplamiento de luz mediante la modificación del ángulo de incidencia sobre la fibra, para hacer que el parámetro NA de la fibra sea menos exigente conforme a la luz entrante.

El objetivo de este montaje no debe confundirse con lograr concentrar más la luz sobre el área de entrada de la fibra (10), un error muy común debido a que es algo que puede parecer lógico. La explicación teórica de la misma se expondrá a continuación.

Para ello se comenzará identificando una de las propiedades más importantes del emisor de luz para el acople de luz, la luminancia, siendo esta  $\frac{mW}{sr \cdot m^2}$ .

La relación  $\frac{mW}{m^2}$ , la cual es la que marca la densidad luminosa de la luz que va a llegar a incidir sobre la superficie de la fibra. Esta densidad es máxima justa a la salida del emisor. En la superficie de la fibra, lo máximo a lo que se puede llegar a aspirar en este sentido es a igualar ese valor en el caso de que el sistema estuviera perfectamente calibrado. Es por ello lo que se afirma que no se puede lograr aumentar la densidad luminosa de una superficie mediante un sistema óptico sin aumentar también a su vez el ángulo de incidencia respecto al receptor..

Para aumentar el acople que tendrá la fibra, el sistema de lentes si que puede usarse para disminuir el ángulo de incidencia a la fibra, que es lo que se intentará hacer.

El esquema del sistema óptico estará mostrado por la siguiente figura.

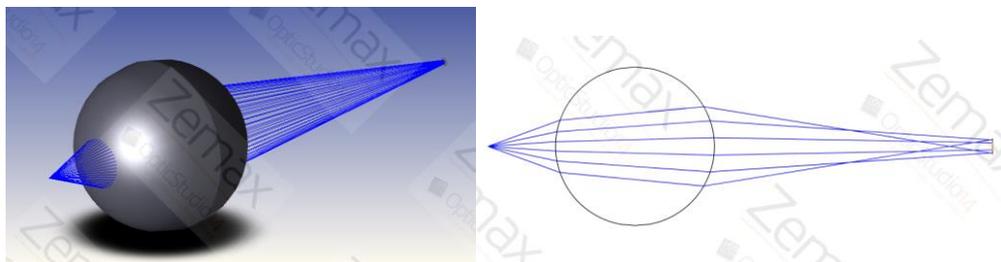


Ilustración 27: Esquema teórico de montaje basado en lentes esféricas

#### 4.1.4.2. Selección de lente

Para el montaje planteado, la correcta selección de la lente correctamente resulta algo imprescindible, por lo que se procede a hacer una búsqueda de la tipología de lente a usar.

Se pasa a enumerar las exigencias del sistema a diseñar:

1. Espacio reducido
2. Máxima eficacia posible

Las exigencias anteriores llevan a la idea de que el tipo de lente debe tener un poder de convergencia grande, con el fin de lograr poder redireccionar aquellos haces de luz los que se emitan con un ángulo mayor.

Tras la correspondiente búsqueda de montajes parecidos realizados, se llega a la conclusión que existen 2 tipos de lentes las cuales cumplen las características deseadas: Lentes esféricas y lentes GRIN (Graded-Index).

Finalmente se eligen cuatro tipos de lentes esféricas, de las siguientes características:

- 1 lente de material n-bk7 de 4 mm de diámetro
- 1 lente de material "Shaphire" de 4 mm de diámetro
- 1 lente de fused silica de 4 mm de diámetro
- 1 lente de h-bk7 de 8 mm de diametro

En principio la lente que se usará será la del tipo n-bk7 y h-bk7, ya que cuenta con una potencia de convergencia alta, así como un espectro de transmisión que para casos generales dará resultados correctos. La lente de "shapire" se usara si hace falta un unas potencia de convergencia diferente, y la de Fused para casos donde se entrase en regiones del ultravioleta por su espectro e transmisión.

#### 4.1.4.3. Resultados obtenidos y discusión de los mismos

Al llevarse a cabo el montaje del sistema óptico anterior, al hacer medidas de la potencia acoplada, se lograrán resultados los cuales están muy por debajo de las expectativas a lograr. Se replantea las asunciones que se había establecido para llevar a cabo las simulaciones, llegando a diferentes conclusiones

1. La asunción de que la superficie emisoras pequeña, y que puede considerarse puntual es completamente incorrecta. El LED usado para estas pruebas es un LED con una superficie de  $1 \text{ mm}^2$  siendo la superficie de la fibra de  $0.0314 \text{ mm}^2$ .
2. Despreciar los errores existentes en el montaje del sistema resulta crítico. A diferencia que en sistemas ópticas para fuentes como podría ser el esquema típico

de la fuente halógena, donde se manejan distancias más grandes, en el sistema planteado para el montaje LED, al manejarse distancias muy pequeñas, de máximo 2mm, un error de posición de tipo de 100um resulta en errores críticos que hacen que no se acople prácticamente nada .

Se vuelve a replantear la simulación, y se puede apreciar en los resultados obtenidos.

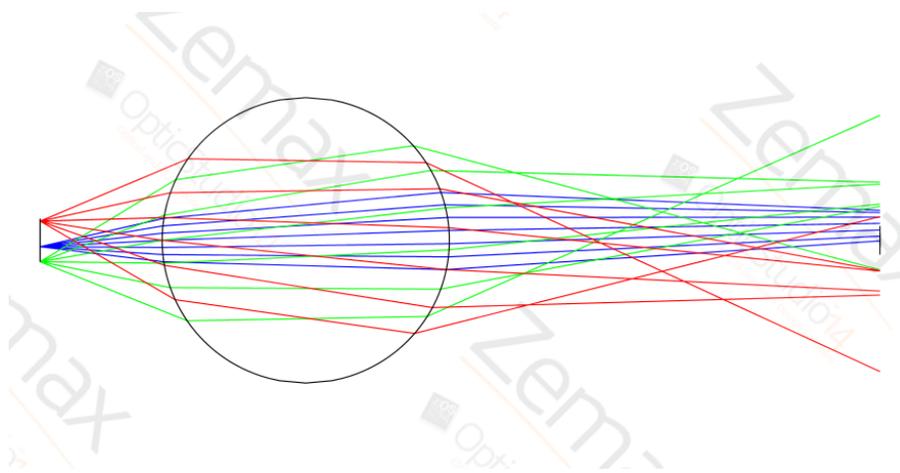
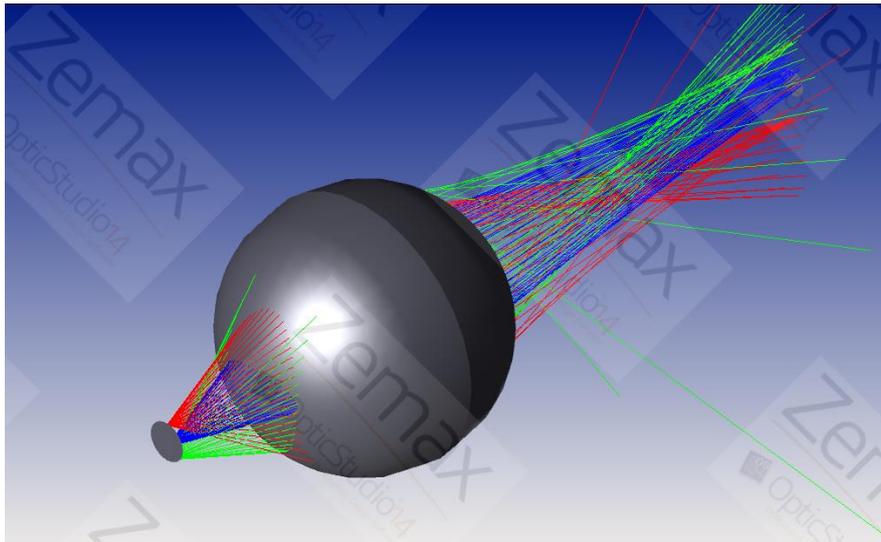


Ilustración 28: Simulación de esquema basado en lentes esféricas real

Viendo los resultados obtenidos se plantean hacer la prueba con la lente colimadora de un láser, con la que se piensa que podrá colimar la luz emisora del LED.

Para ello se usa un LED de longitud de onda de 690 nm, para que la lente colimadora del láser, la cual tiene una ventana de transmisión centradas en longitudes de onda típicas de un láser rojo, no afecte a los resultados obtenidos.

Se vuelven a conseguir resultados de potencia parecidos, con lo que se abordara por 3 vez una manera distinta de usar las lentes como manera de acoplar luz a la fibra.

En este caso se usará la lente focalizadora presente en varias fuentes de oceanoptics.



Ilustración 29: Lente focalizadora de oceanoptics

Los resultados vuelven a ser muy por debajo de lo esperado, con un valor cercano al 20%

#### 4.1.4.4. Conclusiones y Decisiones tomadas

Tras los malos resultados obtenidos en los diferentes intentos de crear un sistema óptico para el acople de la luz del LED, se pasa a analizar el porqué de estos resultados, así como a valorar posibles soluciones, y tomar decisiones al respecto.

Si bien parece que en un marco teórico estos montajes deberían haber dado buenos resultados, parece ser que al llevarlo a la práctica se vuelve algo realmente complicado debido a que se requiere de una altísima precisión para posicionar el LED, la lente y el extremo de la fibra a las distancias deseadas.

La solución más posible parece pasar por la creación una pieza de precisión en la cual irían el LED, la lente y el extremo entrante de la fibra.

Sin embargo, se plantea que aunque, efectivamente se mejoraría el problema de la calibración, los inconvenientes que tendría, empezando por el coste de tal pieza, la cual en el caso

de ser una pieza de gran precisión se prevé que será alto. Además hay que preguntarse si realmente estaría el problema solucionado, o simplemente lo atenuaría.

Ante la posibilidad existente de que no solucionase el problema, y el coste económico que tendría, se decide acabar de intentar lograr un sistema óptico basado en lentes para el acoplamiento de luz, dando por acabado este camino.

## 4.2. Diseño Electrónico. Driver LED.

### 4.2.1. Características a cumplir

En la actualidad, existen en el mercado una serie de exigencias hacia las fuentes de luz en las cuales dependen de la parte de la electrónica, de las cuales las 2 principales están enumeradas a continuación.

1. La característica principal de una fuente de luz, la potencia acoplada a fibra, está directamente relacionada con la corriente suministrada al LED. Aunque, evidentemente, el LED no debe trabajar por encima de su corriente máxima para no dañar el componente, cuanto más corriente se le pueda suministrar con el driver, más potente será la fuente de luz blanca.
2. Al ser las fuentes de luz blanca usadas en un ámbito de sensores, la estabilidad de la señal debe ser excelente tanto en largos periodos, como en cortos. Por ello deberá contar con muy poco ruido, y con una variación de los valores lo más reducida en el tiempo posible.

### 4.2.2. Tipología de fuente de corriente a usar.

Se valoran dos opciones inicialmente para la creación del driver para LED. Por un lado está la opción de hacer una fuente lineal, y por otro lado la opción de una fuente conmutada. A continuación se analizan las ventajas y desventajas de cada tipo de driver con criterio de las características a cumplir.

#### 4.2.2.1. *Driver conmutado*

Una fuente conmutada regulable, debido al funcionamiento interno que tiene, es capaz de suministrar corrientes altas sin tener por ello que disipar mucho calor, con lo que se puede suponer que tendrá menores requerimientos de refrigeración, Sin embargo, como contrapartida está que en cada conmutación, se meterá un rizado en la corriente el cual irá en contra de la precisión de la corriente.

#### 4.2.2.2. *Driver lineal*

La regulación lineal por su característica de funcionamiento tiene una señal mucho más precisa en intervalos cortos de tiempo, sin ningún tipo de rizado. Sin embargo, esta característica de linealidad al llevarse a cabo mediante disipación de calor, existirán más problemas en cuanto a la refrigeración, lo que también podrá influir a largo plazo en la estabilidad de la luz acoplada. El hecho del funcionamiento interno se base en disipación de calor, también limitará la capacidad de suministrar corrientes altas por este tipo de LED.

### 4.2.2.3. Tendencia del mercado

Se realiza una búsqueda para tratar de orientarse en la elección del driver a diseñar. Para ello, se analizan las especificaciones de los diferentes drivers de las empresas líderes en fuentes de luz acopladas a fibra LED disponibles en el mercado, tanto drivers de Thorlabs como de Mightex.

	$I_{max}$	$I_{pp}$	Precio	Empresa	tipo
LEDD1B	1.2A	8mA(rizado)-	263€	thorlabs	conmutada
DC2100	2	20mA	1638€	thorlabs	lineal
SLB-1200-1	1.2	+4mA	549€	mightex	lineal
SLC-SA02-US	1	+4mA	709€	mightex	lineal
SLC-HA02-US	2	+4mA	859€	mightex	lineal

### 4.2.3. Tipología de montaje seleccionado

Dadas las características a cumplir por el driver, se elige finalmente una solución basada en una tipología de montaje lineal. El hecho de que en el mercado actualmente los driver de más alta gama estén basados también en montajes lineales hace pensar que la elección es la acertada.

### 4.2.4. Diseño Realizado

A continuación se muestran tanto el esquemático del diseño realizado como el footprint del pcb.

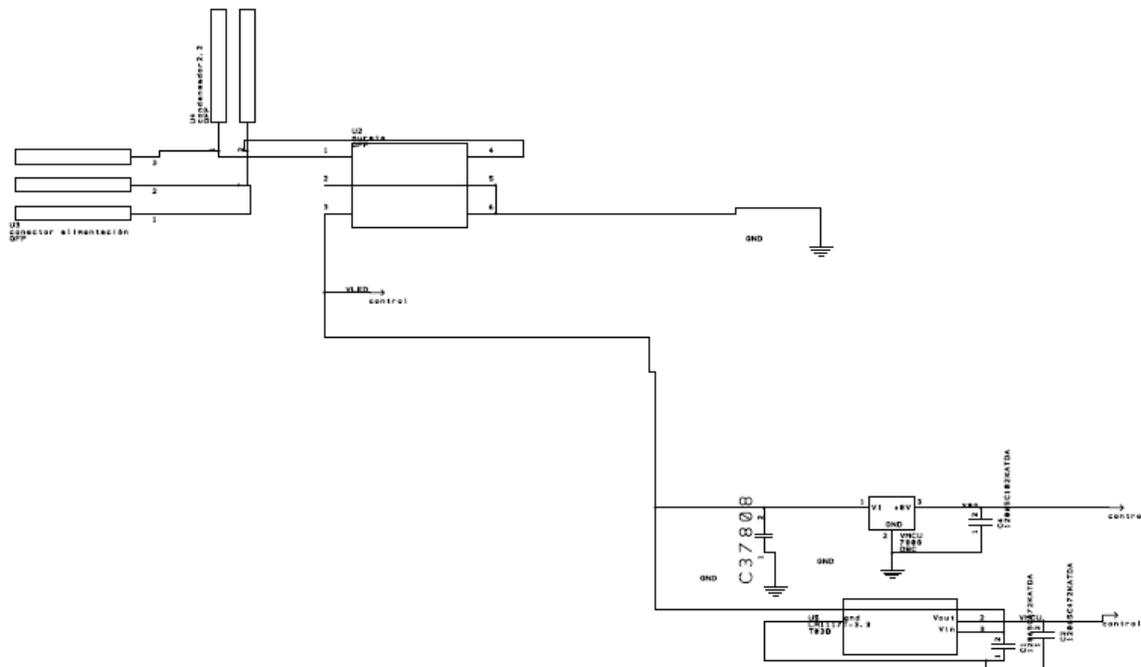


Ilustración 30: Esquemático de la parte de la alimentación

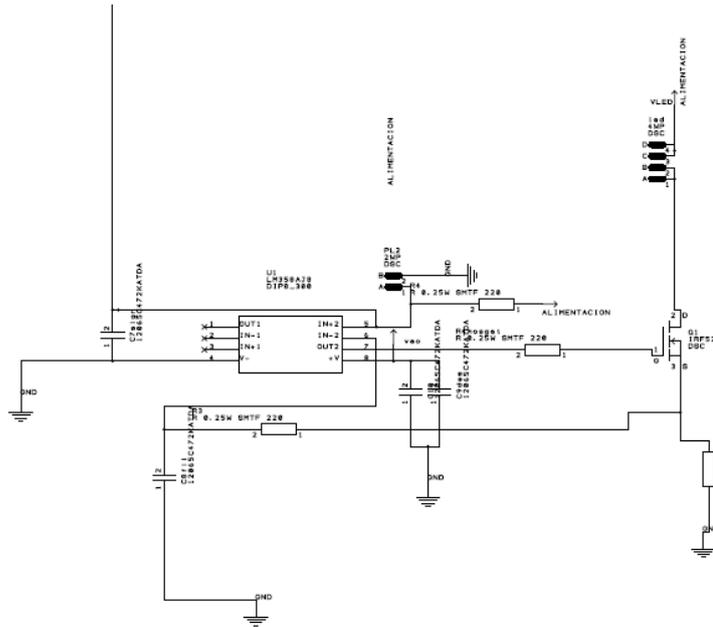


Ilustración 31: Esquemático de la parte de control de corriente del LED

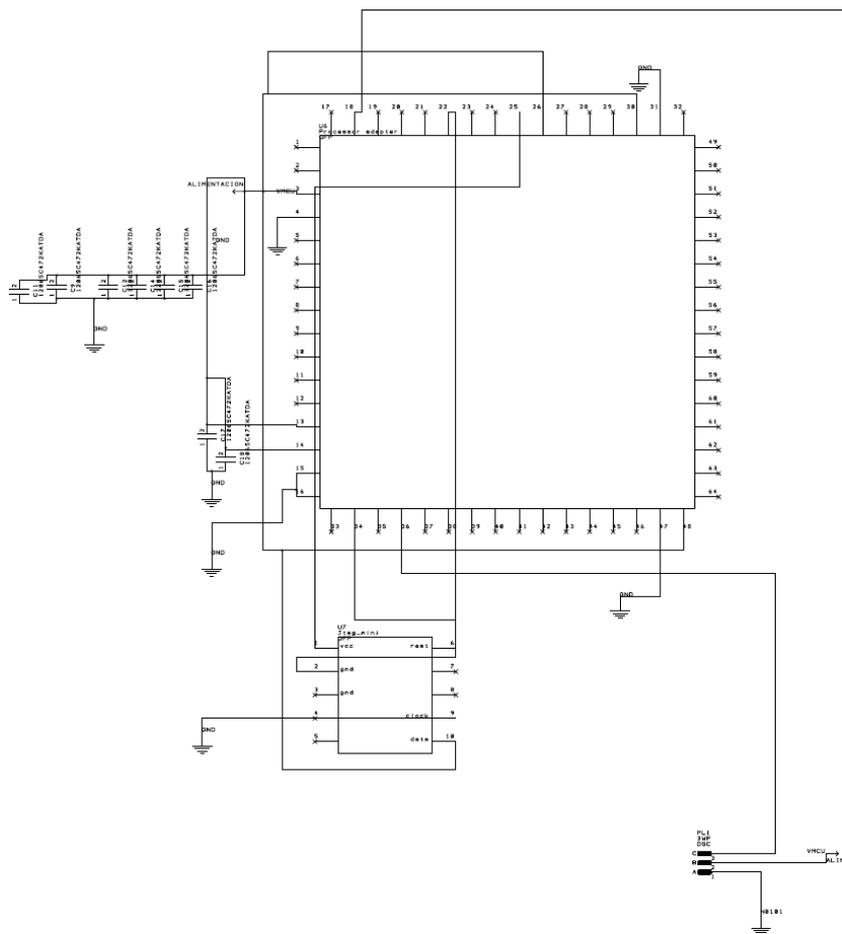


Ilustración 32: Esquemático de la parte del MCU para futuras mejoras

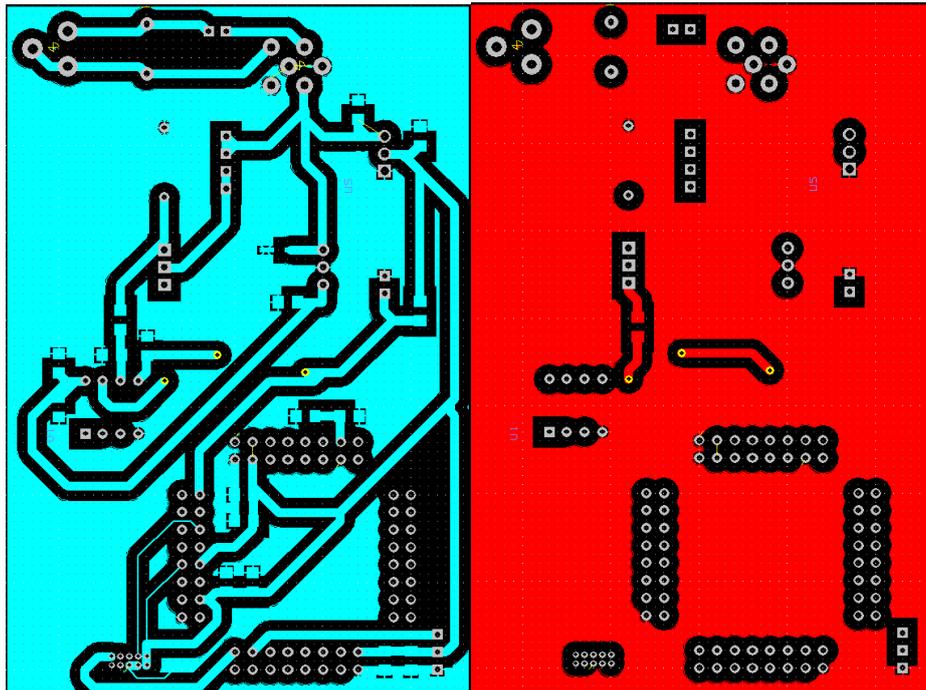


Ilustración 33: Footprint del PCB diseñado

#### 4.2.4.1. Aspectos críticos realizados en el diseño

1. Máximo aislamiento respecto a la fuente de alimentación conmutada exterior. Para lograrlo se ha añadido el componente murata como filtro para frecuencias altas así como un condensador electrolítico para lograr un correcto desacoplo tanto en altas como en bajas frecuencias.
2. Lazo de realimentación lo más corto posible, dado que en versiones anteriores a la final se pudo ver cómo podían existir el acople de diferentes señales que afectaban a las medidas tomadas por el operacional
3. Ausencia total de elementos conmutados. Esto se llevó a cabo debido a la experiencia de versiones de PCB anteriores, ya que se pudo ver como los elementos conmutados afectaban en el lazo de realimentación con consecuencias catastróficas. Este aspecto limitó la capacidad de disminuir la disipación calorífica, debido a que se tuvo que alimentar a la misma tensión el circuito del amplificador operacional que el circuito de potencia del LED, por lo que el MOSFET debía soportar más caída de tensión, aumentando así la potencia disipada.
4. Se adapta el PCB para que en el caso de que en siguientes versiones se quiera introducir en un futuro un microcontrolador sea un paso sencillo.

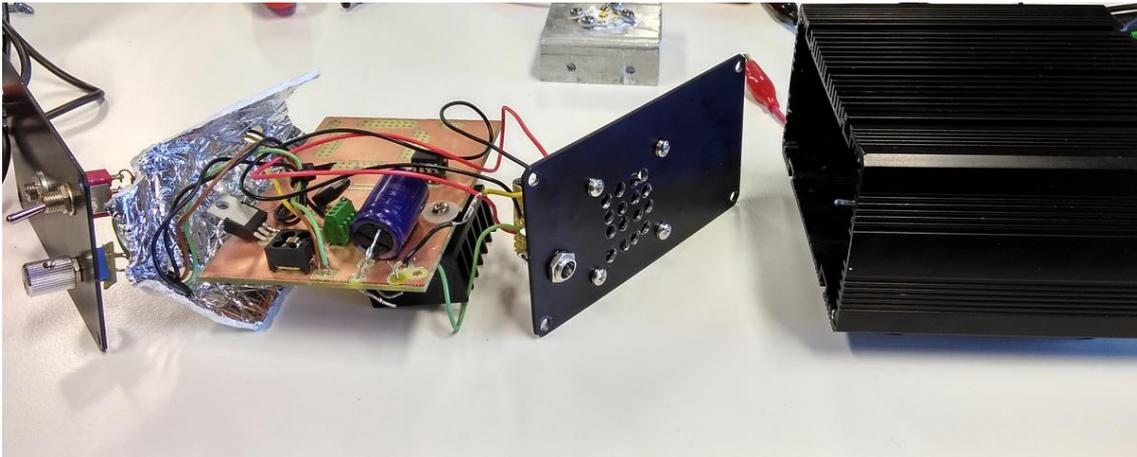


Ilustración 34: PCB antes de ser introducido a la caja

#### 4.2.5. Resultados obtenidos

El driver del LED diseñado y construido cuenta con las siguientes características.

Puede funcionar a la corriente de 2A, lo cual es en principio la corriente necesaria para abarcar todos los LED de un único chip de alta potencia existentes, y la corriente que suelen permitir los drivers para LED de alta potencia. De esta manera, se satisface las demandas en cuanto a la corriente exigida en drivers para fuentes de luz de alta potencia.

En cuanto a la precisión en la corriente que existe es de un  $\pm 2\text{mA}_{pp}$  o de  $\pm 0.25\%$  de la corriente total conducida para su caso más restrictivo. Esto lleva a que el driver está por encima de su rival más directo con este criterio, el driver SLC-SA02-US de la marca Mightex.

Los datos obtenidos están mostrados a continuación, y fueron tomados con el amperímetro cada 200mA.

<b>I[mA]</b>	<b><math>I_{pp}</math>[mA]</b>	<b><math>I_{pp}/I</math></b>
<b>0</b>	1,3	
<b>200</b>	1,6	0,008
<b>400</b>	2	0,005
<b>600</b>	2,8	0,0046
<b>800</b>	3	0,0037
<b>1000</b>	3,3	0,0033
<b>1200</b>	3	0,0025
<b>1400</b>	3,5	0,0025
<b>1600</b>	3,6	0,0022
<b>1800</b>	3,6	0,002

Como se puede ver, es probable que la medida de ruido de corriente medida en el circuito puede que fuese incluso menor, como se puede apreciar en la medida de 0mA, que nos da un ruido parecido a con 200mA, sin embargo es la máxima precisión alcanzable con el medidor de corriente usado.

En cuanto a la estabilidad de periodos largos de funcionamiento, aunque no es directamente un resultado de la electrónica, sino que una mezcla entre esta y de la parte del acoplamiento de luz, se expondrá en este punto, y está representada por los siguientes dos gráficos. En estos estará representada la variación en potencia lograda por el fotodiodo de la marca Ophir y la variación en lambda lograda por el espectrómetro.

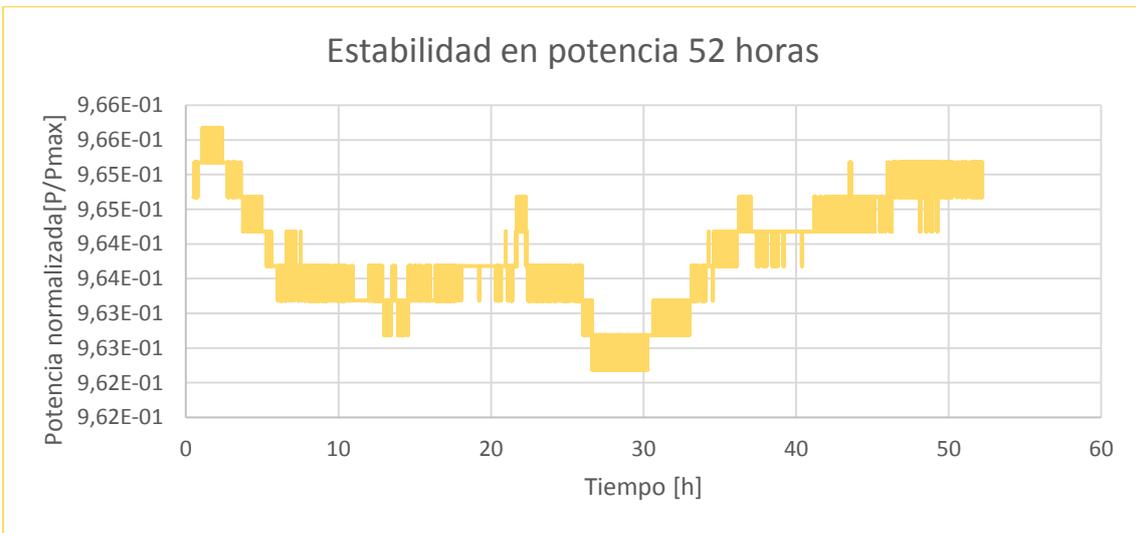


Ilustración 35: Estabilidad en potencia de 52h

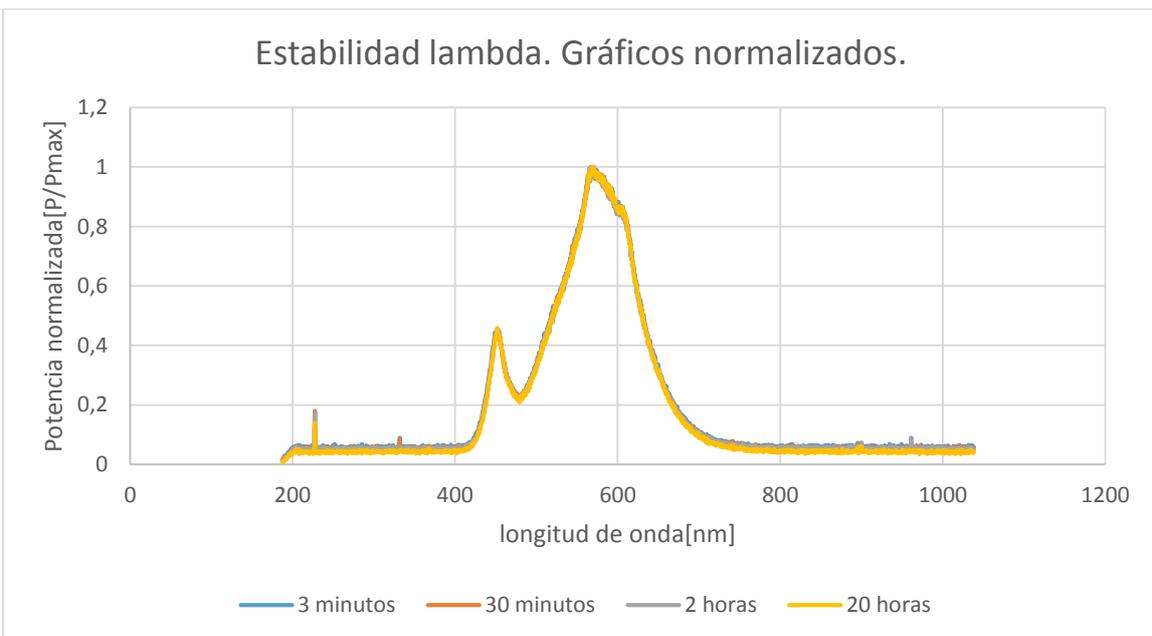


Ilustración 36: Estabilidad en lambda. Gráficos normalizados.

Como se puede ver, la potencia acoplada a la fibra se mantiene relativamente estable, teniendo la variación entre la potencia máxima y la mínima de 0.36% en un intervalo de tiempo de 2 días.

En cuanto las variaciones en el espectro de lambda no se es capaz de apreciar ningún tipo de cambio.

Las variaciones de la potencia acoplada se las atribuye a los cambios de temperatura por el comportamiento observado en las diferentes monitorizaciones de datos a los que se le ha sido sometido durante la realización del proyecto.

## 5. Presupuesto total

En esta sección del proyecto se tratará los aspectos económicos de la fuente de luz comenzando por el presupuesto del equipo, mostrado en la siguiente tabla.

Componente	cantidad	precio unitario	Precio
Transistor IRF-520	1	<b>1,43</b>	1,43 €
Murata	1	<b>4,1</b>	4,10 €
Condensador electrolítico 4,7mF	1	<b>0,923</b>	0,92 €
LM7808	1	<b>0,689</b>	0,69 €
Regulador Lineal 3,3	1	<b>1,35</b>	1,35 €
Conector alimentación	1	<b>2,77</b>	2,77 €
Ventilador	1	<b>5</b>	5,00 €
Disipador	1	<b>3</b>	3,00 €
Potenciómetro corriente	1	<b>1,68</b>	1,68 €
Rsensado	1	<b>0,3</b>	0,30 €
Potenciómetro de panel	1	<b>1,51</b>	1,51 €
Adaptador para potenciómetro	1	<b>1,36</b>	1,36 €
led	1	<b>2</b>	2,00 €
mcpcb	1	<b>1,3</b>	1,30 €
caja	1	<b>16,7</b>	16,70 €
			<b>45,79 €</b>

Ilustración 37: Tabla de presupuesto

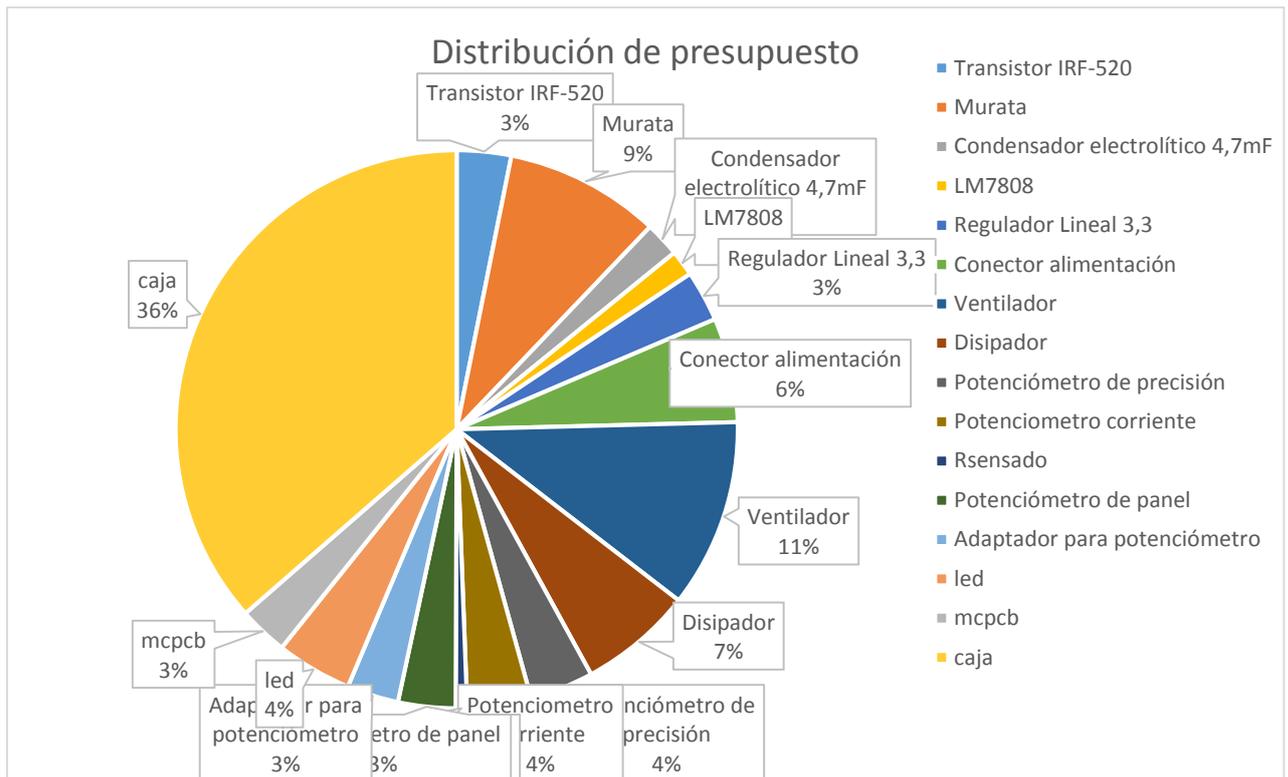


Ilustración 38: Distribución del presupuesto

Destacar que el mayor peso en el equipo en términos de coste es la propia caja, con un 36%, seguido por los elementos de refrigeración, el ventilador y el disipador, llegando entre ellos a un 18%.

Por otro lado el elemento que más valor le otorga al equipo, y el cual es el eje de todo el equipo, el LED, es solamente un 4%.

## 6. Resultados. Comparación con la competencia

Después de realizar el diseño completamente, se procederá resumir las características más importantes del diseño, así como a sacar diferentes ratios, sobre todo de carácter económico. Luego se pasará a hacer una comparación con las principales fuentes de luz LED blancos existentes en el mercado.

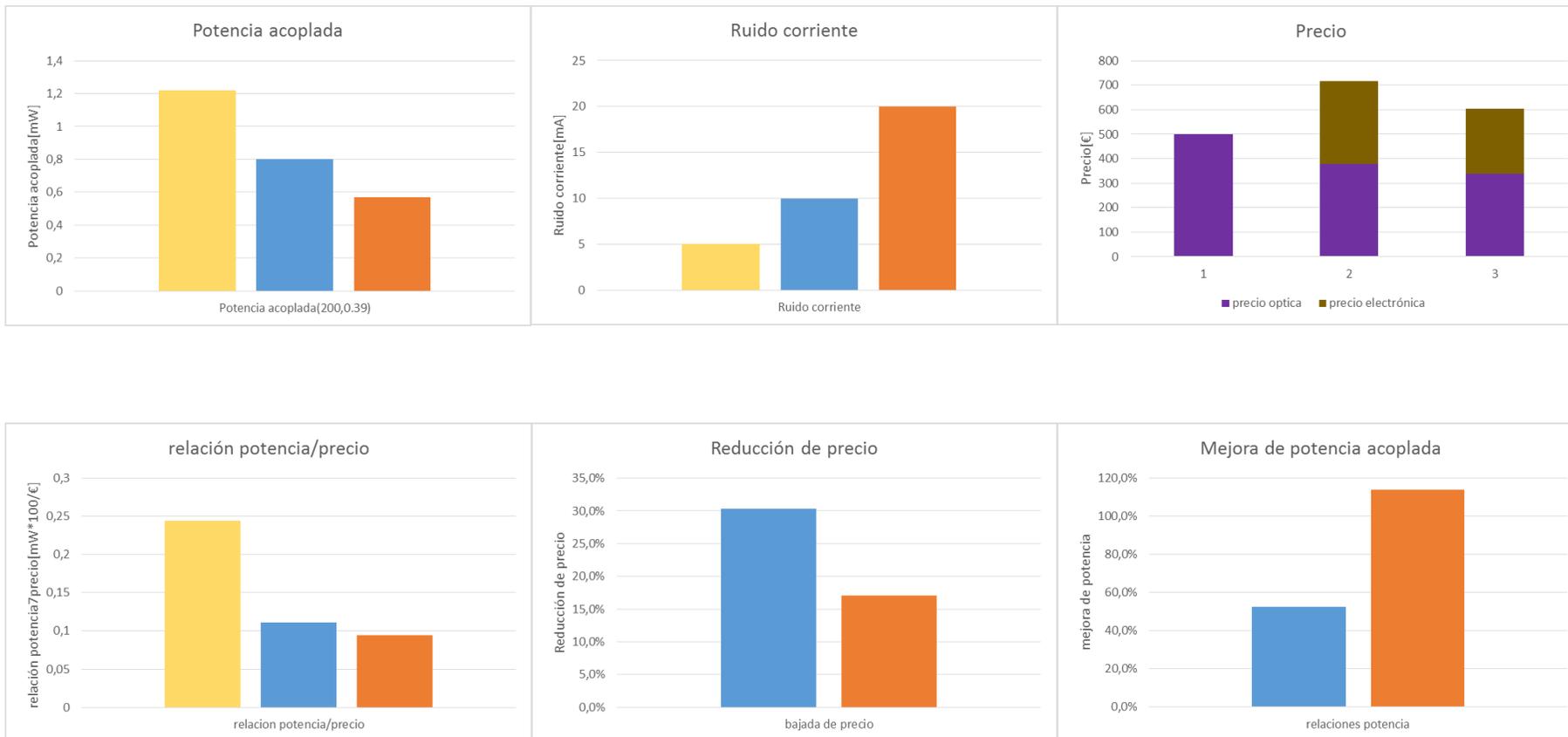
Para hacer las comparaciones también con un criterio económico, se propone un precio orientativo para la fuente de luz blanca diseñada de 500€. Aunque, como se podrá comprobar a continuación, la fuente diseñada cuenta en las características fundamentales de una fuente de luz blanca LED superior al resto, y si mantuviésemos la relación características precio de la competencia, es una fuente que debería valer más que el resto, pudiendo alcanzar fácilmente valores en el mercado de 1000€.

Sin embargo, se recomendó que el precio de la fuente fuese un precio competitivo, por ello la reducción del precio.

Primero, se pasa a escalar la medida de potencia conseguida para fibras de 200um y 400um tanto de 0.22 y 0.39 de valor de la fibra numérica. Se repetirá la operación para los datos ofrecidos por las fuentes de la competencia. Los datos mostrados en rojo son aquellos usados como referencia.

Fuente diseñada			Mightex			Thorlabs		
NA\diametro[um]	200	400	NA\diametro[um]	200	400	NA\diametro[um]	200	400
0,22	1,22	4,88	0,22	0,80	3,20	0,22	0,57	2,29
0,39	3,83	15,34	0,39	2,51	10,06	0,39	1,80	7,20

A continuación página se mostrarán las principales características que tienen las fuentes de luz con el fin de que se pueda establecer de una manera visual la comparación entre la fuente diseñada y las principales fuentes del mercado.



En los gráficos las barras naranjas representarán la fuente creada por la empresa Thorlabs (7), la columna amarilla a la fuente creada por la empresa Mightex (11) y las amarillas la fuente diseñada en este proyecto.

De esta manera se da por concluido el proyecto, ya que se puede decir que se han cumplido los objetivos establecidos mediante el diseño y la fabricación de una fuente de luz blanca acoplada a fibra basada en tecnología LED que supera en las características más fundamentales del resto de fuentes del mismo tipo presentes en el mercado.

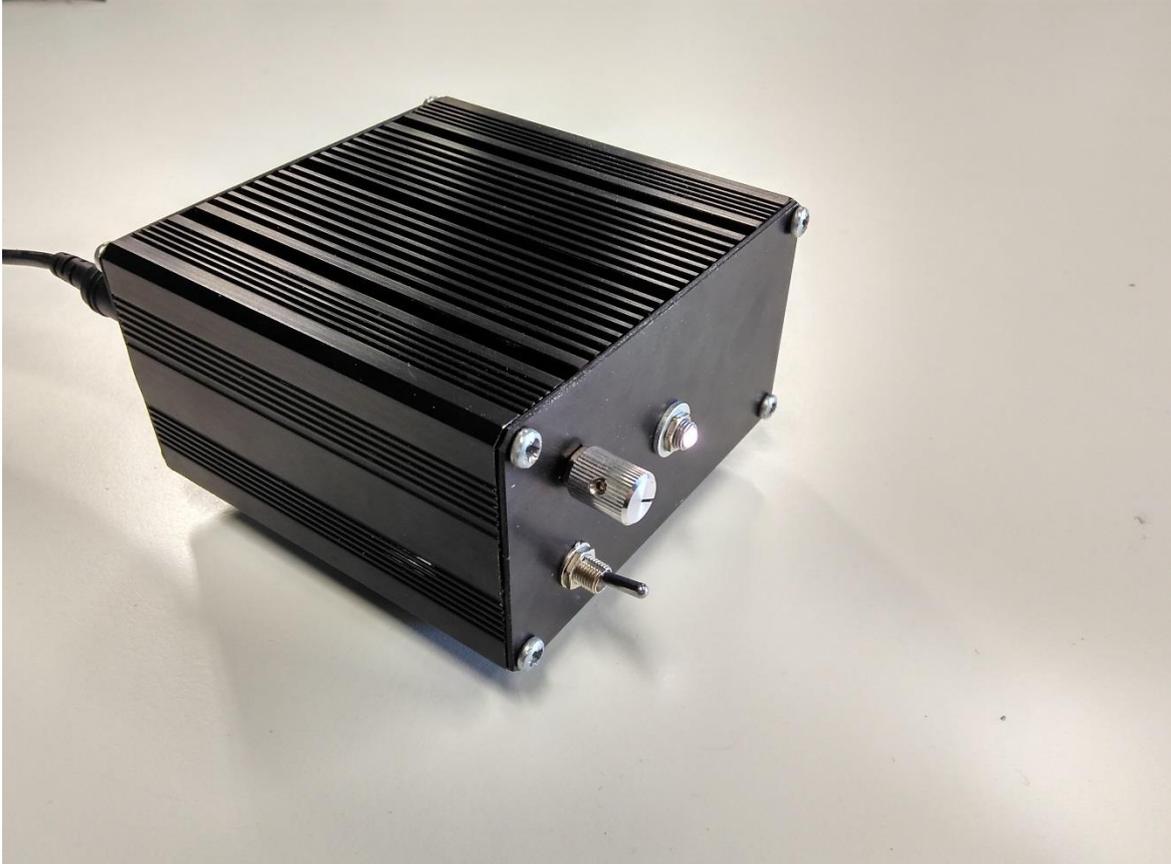


Ilustración 39: Fuente de luz LED blanca acoplada a fibra diseñada en el proyecto

## 7. Bibliografía

---

1. **bentham**. *bentham*. [En línea] <http://www.bentham.co.uk/wls100.htm>.
2. **open-photonics**. open-photonics. [En línea] <http://www.open-photonics.com/featured-technologies/high-brightness-fiber-coupled-light-source>.
3. **Néron, Jean-Luc**. *FIBER COUPLING EFFICIENCY CALCULATION*. 2005.
4. **Osram**. Osram. [En línea] [www.osram.com](http://www.osram.com).
5. **Knudsen , Solvej y Thilde Pedersen, Freja**. *Producing adiabatic fiber tapers Numerical simulations and measurements*.
6. *The shape of fiber taper*. **Timothy A, Birks and Youwei W, Li**. 1992, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY,.
7. **Thorlabs**. Thorlabs. [En línea] <https://www.thorlabs.de/>.
8. *Grinded polymer fiber couplers*. **Hans Kragl**.
9. <https://fibertech-optica.com/led-light-source/>. fibertech optica. [En línea] <https://fibertech-optica.com/led-light-source/>.
10. **Newport**. newport. [En línea] <http://www.newport.com/Fiber-Optic-Coupling/144877/1033/content.aspx>.
11. **Mightex**. Mightex. [En línea] <http://www.mightexsystems.com/>.
12. **rp-photonics**. rp-photonics. [En línea] <http://www.rp-photonics.com/>.
13. **Lian, Zhong-Yan**. *Tapered Plastic Optical Fiber, Optical transmission and Applied Research*. 2007.
14. **Syuhaimi Ab-Rahman, Mohd , Guna, Hadi y Hazwan Harun, Mohd .** *1xN Self-Made Polymer Optical Fiber Based Splitter for POF-650nm-LED based Application*.
15. **Wetzel, Stephen J**. *Coupling light emitting diodes to multimode optic fibers*.

<i>Ilustración 1: Fuente de luz blanca halógena de 100W de la casa bentham (1)</i>	9
<i>Ilustración 2: Fuente de luz láser blanca mediante fibra dopada con fosforo. Laser dopado (2).</i>	10
<i>Ilustración 3: Configuración típica de butt-coupling</i>	11
<i>Ilustración 4: LED single-chip vs multi-chip</i>	14
<i>Ilustración 5: Ejemplo de la gran cantidad de resultados mostrados en LED de alta potencia blancos</i>	14
<i>Ilustración 6: LED oslon square</i>	15
<i>Ilustración 7: Potencia de cada tipo de blanco y relación potencia/corriente</i>	15
<i>Ilustración 8: Diferentes tipos de blanco del LED oslon square</i>	16
<i>Ilustración 9:MCPCB para LED oslon square</i>	16
<i>Ilustración 10: Espectro del LED OSOLON SQUARE después de calibración de espectrómetro</i>	17
<i>Ilustración 11: Comparación espectros LED con lente y lente extraída</i>	18
<i>Ilustración 12: Esquema de funcionamiento de taper para acoplamiento de luz</i>	20
<i>Ilustración 13: Esquema de fabricación</i>	21
<i>Ilustración 14: Uso de taper con LED ámbar</i>	21
<i>Ilustración 15: Uso de taper con LED blanco ecualizado</i>	22
<i>Ilustración 16: Perdidas por imperfecciones en las paredes</i>	23
<i>Ilustración 17: Simulaciones de taper de 400um-125um y 400um-200um, de izquierda a derecha</i>	24
<i>Ilustración 18: Simulaciones de taper de 600um-125um, 600um-200um, y 600um-400um, de izquierda a derecha</i>	24
<i>Ilustración 19: Simulaciones de taper de 800um-125um, 800um-200um y 800um-400um, de izquierda a derecha</i>	25
<i>Ilustración 20: Simulaciones de taper de 1000um-200um, 1000um-400um, 1000um-600um y 1000um-800um, de izquierda a derecha</i>	25
<i>Ilustración 21: Ejemplo forma de taper adiabático (4)</i>	27
<i>Ilustración 22:SLED de la compañía Thorlabs (5)</i>	28
<i>Ilustración 23: Esquema de splitter para acoplamiento de luz</i>	29
<i>Ilustración 24: Splitter 1 x 2</i>	31
<i>Ilustración 25: Espectro fuente multi-led fiber-tech (7)</i>	32
<i>Ilustración 26: Splitter 1 x 7</i>	32
<i>Ilustración 27: Esquema teórico de montaje basado en lentes esféricas</i>	34
<i>Ilustración 28: Simulación de esquema basado en lentes esféricas real</i>	36
<i>Ilustración 29: Lente focalizadora de oceanoptics</i>	37
<i>Ilustración 30: Esquemático de la parte de la alimentación</i>	40
<i>Ilustración 31: Esquemático de la parte de control de corriente del LED</i>	41
<i>Ilustración 32: Esquemático de la parte del MCU para futuras mejoras</i>	41
<i>Ilustración 33: Footprint del PCB diseñado</i>	42
<i>Ilustración 34: PCB antes de ser introducido a la caja</i>	43
<i>Ilustración 35: Estabilidad en potencia de 52h</i>	44
<i>Ilustración 36: Estabilidad en lambda. Gráficos normalizados.</i>	44
<i>Ilustración 37: Tabla de presupuesto</i>	46
<i>Ilustración 38: Distribución del presupuesto</i>	47
<i>Ilustración 39: Fuente de luz LED blanca acoplada a fibra diseñada en el proyecto</i>	50