

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

Diseño y fabricación de fuente de luz blanca halógena



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Iker Beloso Sancet

Ignacio Raúl Matías Maestro

Pamplona, 23 de Junio de 2015



ÍNDICE

1.	Introducción y objetivos.....	6
1.1.	Introducción	6
1.2.	Objetivos	7
2.	Contexto tecnológico y estado del arte	8
2.1.	Contexto tecnológico del proyecto dentro de la Universidad Pública de Navarra.....	8
2.1.1.	Breve descripción del ámbito de uso del dispositivo.....	8
2.1.2.	Necesidad del proyecto.....	9
2.2.	Estado del arte de fuentes de luz blanca	9
2.2.1.	Tecnología	9
2.2.2.	Situación comercial actual de las fuentes de luz.....	11
3.	Análisis general de la fuente de luz blanca	24
3.1.	Sistema óptico.....	24
3.1.1.	Elemento generador de luz	24
3.1.2.	Conjunto de lentes y reflectores	25
3.1.3.	Fibra óptica.....	26
3.2.	Alimentación de la fuente de luz.....	26
3.2.1.	Tipo de alimentación (Corriente Continua o Corriente Alterna).....	26
3.2.2.	Alimentación interna o alimentación externa	27
3.3.	Electrónica digital.....	28
3.4.	Estructura y apariencia externa	29
3.5.	Ventilación y refrigeración	29
4.	Propuesta de fuente de luz	30
4.1.	Óptica y opto-mecánica	30
4.1.1.	Óptica	30
4.1.2.	Opto-mecánica	38
4.1.3.	Calibración.....	42
4.2.	Alimentación	45
4.3.	Circuito de control de la potencia de la fuente de luz	47
4.3.1.	Estudio del comportamiento de la bombilla halógena	47
4.3.2.	Análisis de soluciones de regulación	49
4.3.3.	Solución de regulación adoptada.....	51
4.3.4.	Problema en la alimentación debido al regulador de tensión.	52
4.4.	Microcontrolador	53
4.4.1.	Selección de microcontrolador	53
4.4.2.	Función del microcontrolador.....	55

4.4.3.	Entorno de programación	57
4.4.4.	Debugging y programación	57
4.5.	Circuito para las señales analógicas y el controlador digital.....	58
4.6.	PCB y estudio de la electrónica	60
4.6.1.	PCB	60
4.6.2.	Estudio de la electrónica	65
5.	Ensayos.....	67
5.1.	Ensayo Ophir	68
5.2.	Ensayo Espectrómetro USB2000.....	69
5.3.	Consideraciones de los ensayos.....	71
5.4.	Potencia acoplada	72
6.	Presupuesto	75
7.	Conclusiones y líneas de mejora	76
7.1.	Conclusiones.....	76
7.2.	Líneas de futuro	77
8.	Tabla de ilustraciones.....	79
9.	Bibliografía	81
10.	Anexos.....	82
10.1.	Código del microcontrolador	82

ABSTRACT

In this project, it will be explained the work developed towards the Design and fabrication of a halogen white light source. The light source has been designed in order to couple optical power into an optical fiber trying to provide a broadband spectrum in the visible range. The main features of this device were, on one hand a high stability during long periods of time and, on the other, the maximum coupling of optical power. This project will include all the optical, opto-mechanical and electro-optical designs in order to get the above proposed objectives.

Key words: *Halogen, Light Source, Fiber coupled, Fiber*

RESUMEN

El Proyecto que se presenta a continuación describe como se ha llevado a cabo el diseño y la fabricación de una fuente de luz blanca halógena. Este dispositivo de laboratorio está diseñado para acoplar potencia lumínica a la fibra óptica intentando cubrir todo el espectro visible. La estabilidad de la salida y la maximización de la potencia serán los principales objetivos a abordar en este dispositivo. Este proyecto incluye toda la dimensión óptica, opto-mecánica y de diseño electrónico para cumplir dichos fines.

Palabras clave: *Halógena, Fuente de luz, Acoplada a fibra, Fibra óptica*

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto comprende el diseño y la fabricación de una fuente de luz blanca acoplada a una fibra óptica basada en tecnología de bombillas halógenas. Se tratará de maximizar la potencia acoplada a la fibra óptica de manera que la fuente sea apropiada para el uso en sensores de fibra óptica en el laboratorio de Sensores de la Universidad Pública de Navarra. Se ha de tener en cuenta que la salida de la fuente de luz debe ser lo más estable posible, sin variaciones que puedan comprometer la realización de los ensayos para los cuales está diseñada.

Este proyecto abarca el estudio de la óptica, implementación de esta, diseño de electrónica, diseño del controlador digital y la alimentación del mismo.

Una fuente de luz blanca idealmente es un dispositivo que emite potencia constante en todas las longitudes de onda. En el caso de trabajo con fibra óptica el rango de longitudes de onda se puede reducir al rango en el que se desea trabajar, en este caso el rango de longitudes de onda de lo visible.

A la hora de querer integrar las distintas longitudes de onda, es posible recurrir a diferentes tecnologías para ello. En este caso, dado que se busca el acoplo de todas las longitudes de onda de la región de lo visible se llevará a cabo mediante bombilla halógena como se explicará posteriormente. Por otro lado, la maximización de la potencia se llevará a cabo gracias al sistema óptico integrado en el dispositivo, el cual mediante una adecuada calibración conseguirá acoplar a una fibra la potencia que sea necesaria. Para finalizar, la estabilización de la salida se llevará a cabo mediante un control realimentado de potencia debido a la poca estabilidad en potencia a lo largo del tiempo que presentan las bombillas halógenas.

Se establecen así diferentes objetivos planteados a lo largo del proyecto que abarcan varias disciplinas:

- Investigación: se ha de conocer el ámbito de la fibra óptica, que hasta el momento apenas se ha tratado en el transcurso de la carrera. Se han de conocer los productos similares existentes hoy en día, su funcionamiento, características y posibilidad de mejora que existe en ellos.
- Mecánica: se ha de diseñar el sistema en el cual irá integrada la fuente de luz halógena de manera que sea resistente teniendo en cuenta los materiales y la facilidad de su desarrollo.

- Instrumentación: se ha de obtener información propia del sistema con el fin de conocer el estado en el que se encuentra la bombilla halógena respecto a la referencia establecida.
- Microcontroladores y programación: incluye la elección y programación de los dispositivos de tratamiento de la información obtenida por el sensor, procesado y transformación en señal de control.
- Control: se ha de desarrollar un algoritmo de control adecuado capaz de responder correctamente al sistema. Este algoritmo de control estará integrado en el microcontrolador elaborando la respuesta apropiada que el sistema necesita.
- Potencia: comprende la alimentación del sistema y manipulación de señales internas de alimentación.

1.2. OBJETIVOS

La meta del proyecto es conseguir un prototipo funcional del equipo de laboratorio descrito. Para llegar a este objetivo final se han de ir cumpliendo diversos objetivos que lleven en conjunto a la ejecución del objetivo final. Se presentan a continuación:

- Análisis e investigación de necesidades.
- Elección de componentes.
- Analizar capacidades del sistema óptico.
- Obtención de datos a través de sensores.
- Implementación del control.
- Programación del microcontrolador.
- Control de la potencia.
- Ensayos.
- Generación de conclusiones.

2. CONTEXTO TECNOLÓGICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. CONTEXTO TECNOLÓGICO DEL PROYECTO DENTRO DE LA UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

2.1.1. BREVE DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE USO DEL DISPOSITIVO

Dentro del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pública de Navarra se encuentra el grupo de investigación de sensores en el cual actualmente se investiga y trabaja con sensores basados en fibra óptica. Estos sensores actúan, debido a su naturaleza, dejando pasar o reteniendo diferentes longitudes de onda de manera que esta sea la información de la variable que se está midiendo.

Dicho de una manera simple, los sensores de fibra óptica se basan en el estudio de pérdidas de potencia lumínica en longitudes de onda concretas debidos a recubrimientos depositados sobre la fibra óptica y la naturaleza de estos.

Con el fin de poder trabajar e investigar en este campo, se requieren dispositivos de laboratorio con los cuales se pretende ser capaz de llevar a cabo las mediciones. Para ello, el equipo básico para trabajar con sensores de fibra óptica se compone de:

- Fuente de luz blanca
- Espectrómetro
- Sensor de fibra óptica
- Ordenador

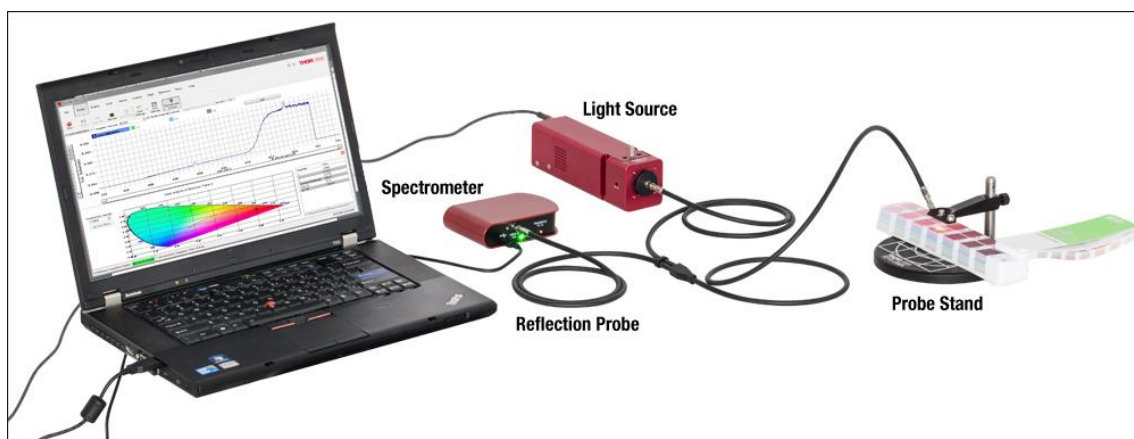


ILUSTRACIÓN 1: CONJUNTO DE DISPOSITIVOS PARA ENSAYOS (THORLABS.DE)

La fuente de luz blanca se empleará con el fin de generar un espectro que idealmente emitirá en toda las longitudes de onda de una manera uniforme, de ahí su nombre de fuente de luz blanca.

La luz viajará por la fibra óptica hasta llegar al punto donde se encuentra el sensor. En este punto, debido al material con el cual se ha recubierto el material y el agente externo que actuará sobre este material (por ejemplo el pH) se generará una pérdida de potencia localizada que además sigue diferentes fenómenos como resonancias que se estudian en la Universidad Pública de Navarra.

Una vez causada la pérdida de potencia, mediante el espectrómetro se llevará a cabo la medición necesaria en el otro extremo de la fibra óptica.

Gracias a un ordenador y un softwares apropiados podremos realizar el estudio de las diferentes variaciones en potencia y longitud de onda en función del material depositado en la fibra y el agente que actúa sobre este material.

Es con este conjunto de dispositivos con los cuales se están llevando a cabo las investigaciones actuales en sensores en la Universidad Pública de Navarra.

2.1.2. NECESIDAD DEL PROYECTO

La necesidad de este proyecto se presenta con la existencia de dependencia de la Universidad Pública de Navarra de empresas que suministran este tipo de dispositivos.

Por un lado, este tipo de dispositivos presentan un precio muy elevado para la tecnología que implementan.

Este tipo de dispositivos además, presentan una vida útil reducida ya que son elementos que trabajan en unas condiciones de deterioro elevadas. Esta reducida vida útil implica la necesidad de reparación o compra de elementos especiales para ellos, por ejemplo, las fuentes de luz halógena implementan bombillas especiales fabricadas por los fabricantes de estas fuentes de luz, lo que no permite un trabajo con bombillas comerciales e incrementa el precio del producto con el paso del tiempo debido al precio estas bombillas especiales.

2.2. ESTADO DEL ARTE DE FUENTES DE LUZ BLANCA

2.2.1. TECNOLOGÍA

Aunque la tecnología de iluminación LED ha conseguido sustituir a las bombillas incandescentes en muchos ámbitos, sigue siendo habitual el empleo de bobillas halógenas en

los campos de investigación, más concretamente en temas de óptica debido al espectro que presentan. Estas bombillas emiten desde una región muy próxima al ultravioleta y su cola dura hasta regiones del infrarrojo. El pico de emisión de las fuentes de luz halógena se puede encontrar en longitudes de onda del infrarrojo o en longitudes de onda de lo visible pero muy cercanas a este. El pico depende de la emisión de cuerpo negro, la cual implica que cuanto más se calienta la bombilla, más se desplaza el pico de potencia hacia longitudes de onda menores, emitiendo en consecuencia más en lo visible.

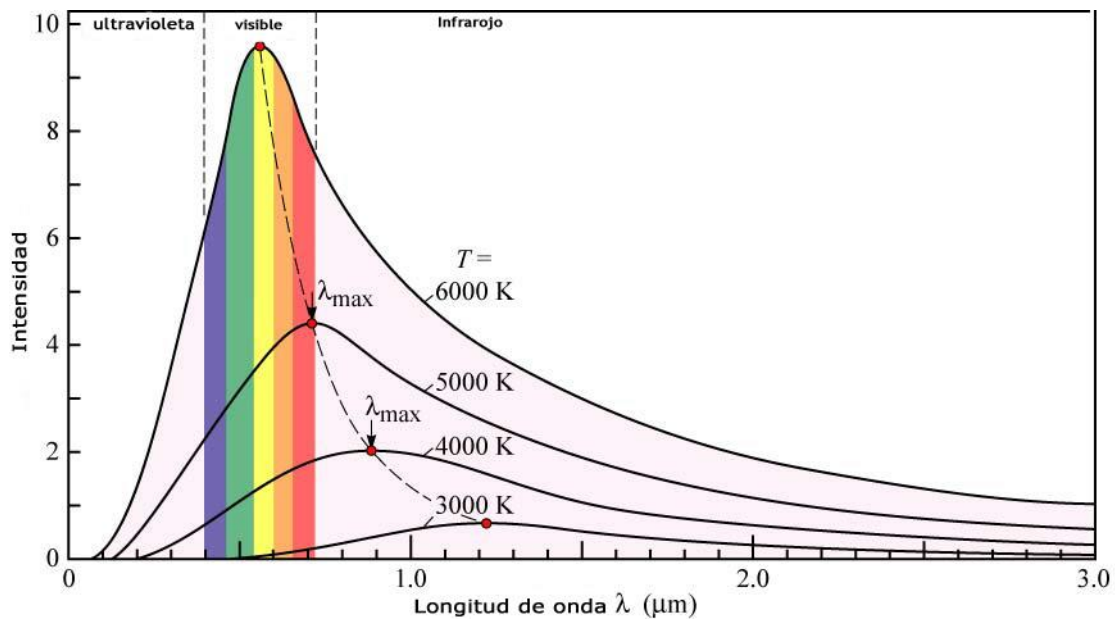


ILUSTRACIÓN 2: EMISIÓN DE CUERPO NEGRO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

A continuación se muestra una imagen del espectro de una de estas bombillas halógenas:

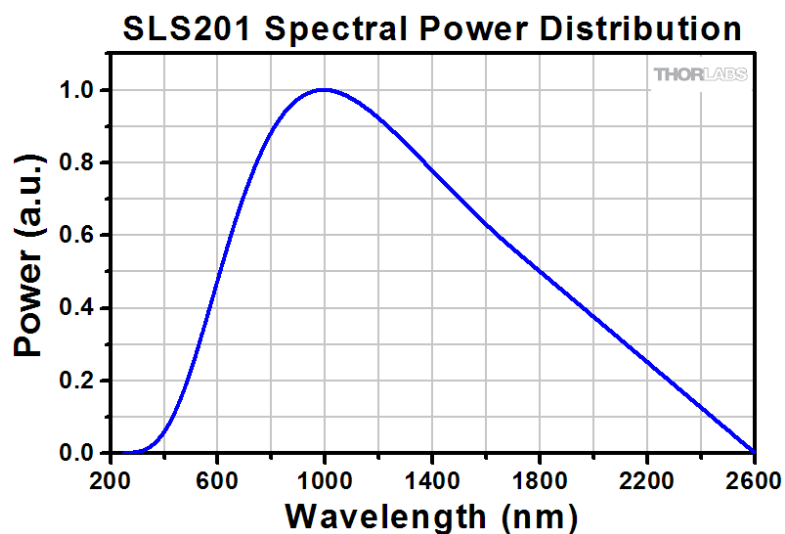


ILUSTRACIÓN 3: ESPECTRO DE BOMBILLA HALÓGENA (THORLABS.DE)

Gracias a esta tecnología de emisión, se consigue trabajar en un rango de longitudes de onda muy amplio y relativamente constante en comparación con el resto de fuentes de luz.

Puede así decirse que las fuentes de luz halógenas se comportan de una manera parecida a la que se comportaría una fuente de luz blanca (emisión en todo el espectro de manera continua) dentro del rango de lo visible. Es este el requerimiento que se quiere satisfacer en primer grado con el desarrollo de este proyecto, diseño y fabricación de una fuente de luz blanca que se empleará con el fin de acoplar luz a la fibra óptica.

2.2.2. SITUACIÓN COMERCIAL ACTUAL DE LAS FUENTES DE LUZ

Existen inmensidad de laboratorios y campos que hacen uso de fuentes de para sus ensayos y experimentos, lo que lleva a una gran cantidad de fabricantes de fuentes de luz blanca ya sea en el ámbito medicinal, químico, biológico, etc. Dependiendo de la aplicación sobre la cual se quiera trabajar se requiere de diferentes bandas en el espectro de longitudes de onda y para ello se emplean diversas fuentes de luz. Se pueden encontrar fuentes LED con una banda estrecha, fuentes de deuterio con emisión en el ultravioleta, fuentes laser que solo emiten en una longitud de onda y las fuentes halógenas que son las que más rango pueden llegar a cubrir.

Es en el trabajo con la fibra óptica donde este mercado se ve más reducido. Debido a la complicación que puede suponer un adecuado y óptimo acoplo de esta luz de una fuente de luz halógena a la fibra óptica existe un número menor de empresas que se encargan de esto, aunque estas presentan distintas alternativas de ellas. En todo caso, las fuentes de luz blanca actuales suelen presentar carencias en ciertas características clave de estos sistemas, las cuales se quieren intentar cumplir en el proyecto desarrollado. A continuación se enumeran las tres carencias principales que se presentan en las actuales fuentes de luz blanca (halógenas):

- Primera carencia, potencia. Las fuentes de luz halógenas presentan una gran complicación para acoplar la luz que generan. Dado que su elemento principal es una bombilla, que se comporta aproximadamente como un cuerpo de emisión difusa, es técnicamente muy complicado concentrar una gran potencia lumínica en un punto, por lo que se requiere de un complejo sistema de lentes para llevarlo a cabo. Este sistema de lentes generalmente se compone de un espejo o reflector de la bombilla y una lente convexa que se encargará de concentrar el haz de luz. Todo esto lleva a una elevada complejidad de desarrollo de un sistema que acople una potencia considerable.
- Segunda carencia, estabilidad: Debido a la propia física de las bombillas halógenas, en caso de horas, la potencia puede verse reducida en más de un 4%. Esto puede comprometer los experimentos que se están realizando y falsear los datos en las

mediciones obtenidas. Con el fin de evitar los problemas que esta carencia puede llevar a cabo se pretende realizar un lazo cerrado de realimentación que se encargue de controlar la estabilidad de la fuente de luz.



ILUSTRACIÓN 4: MEDICIONES DE PÉRDIDAS DE POTENCIA DE BOMBILLA CONVENCIONAL

- Tercera carencia, precio: Las fuentes de luz blancas para la fibra óptica actuales presentan un elevado precio a pesar de la tecnología que implementan. Los precios pueden verse oscilar en rangos de cuatro cifras. Con el fin de solventar el gasto que le pueden suponer equipos de estas características al grupo de investigación de sensores de la Universidad Pública de Navarra, se pretende aplicar una reducción de costes que pueda suponer una reducción sustancial en el precio de este dispositivo sin comprometer características que puedan mejorar su finalidad.

A continuación se mostrarán diversas fuentes de luz comerciales que se encuentran a la venta a día de hoy. Se añadirán los comentarios que se crean oportunos respecto a las fuentes junto con la información relevante que se suministra acerca de ellas.

2.2.2.1. AVALIGHT-DHC FULL-RANGE COMPACT LIGHT SOURCE

Avantens enlightering spectroscopy es una empresa dedicada a la venta de instrumentación óptica para el trabajo de fibra óptica ya sea desde espectrómetros, fibra o fuentes de luz blanca. Es ahí donde se han de investigar las características de estas.

A Avalight-DHc Full-range Compact Light Source es una combinación de fuente de luz halógena más fuente de luz de deuterio, empleada para la emisión en longitudes de onda del ultravioleta. Gracias a ello la emisión va desde los 200 hasta los 2500 nm. La fuente de luz de deuterio emite entre los 200 y 550 nm y la halógena cubre el campo hasta los 2500nm. Dispone de un conector SMA para el acoplo de esta luz a la fibra óptica multimodo.



ILUSTRACIÓN 5: BOMBILLA DE DEUTERIO SITUADA EN EL INTERIOR DE LA FUENTE AVALIGHT-DHC

Dispone de un shutter TTL controlado con un interruptor de manera que aunque la luz siga encendida no se esté acoplando luz a la fibra óptica con lo que se pueden tomar medidas de negro para luego compararlas con las mediciones de luz.



ILUSTRACIÓN 6: FUENTE DE LUZ AVALIGHT-DHC FULL RANGE COMPACTE LIGHT SOURCE

A continuación se muestra una tabla con características que el fabricante dispone en la página web del producto:

	Deuterium Light Source	Hálogeno Light Source
Rango de longitudes de onda	200-400 nm	400-2500nm
Tiempo de calentamiento	8 min	1 min
Deriva	<0,25%/h	<0,25/h
Potencia en fibra de 600um	0,2 uW	7 uW
Tiempo de vida de la lámpara	1000 h	2000 h

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS AVALIGHT-DHC FULL-RANGE COMPACT LIGHT SOURCE

Con los datos de la tabla se puede deducir que aunque la fuente de luz dispone de una adecuada estabilidad, no es adecuada para el uso en casos de elevadas pérdidas como los que se dan en el trabajo con los sensores de fibra óptica, carencia que ha de ser solucionada. La reducida potencia se ve generalizada en los dispositivos que implementan bombillas de deuterio

debido a la dificultad añadida que es el acople de potencia de dos cuerpos de emisiones altamente difusas.

2.2.2.2. AVALIGHT-HAL-(S)-MINI

El mismo fabricante suministra una opción más económica de fuente de luz la cual únicamente trabaja en la región de lo visible y cierta parte del infrarrojo. Dispone de una conexión ajustable con el fin de maximizar la potencia acoplada. Es posible insertar filtros en salida de la fuente de luz con el fin de bloquear la longitud de onda que se desee. Para ello se requerirán de soportes adecuados para estos filtros que se inserten en la boquilla de salida. El cambio de bombilla es sencillo y puede realizarse en cuestión de minutos.



ILUSTRACIÓN 7: FUENTE DE LUZ AVALIGHT-HAL

La fuente tiene un tamaño menor que la anterior y existen tres fuentes diferentes las cuales están diseñadas para tener un tamaño reducido, un mayor tiempo de vida de la bombilla o una mayor potencia en la salida. Los gráficos de su potencia relativa se muestran a continuación. Gran potencia (verde), estándar (roja) y potencia reducida (azul).

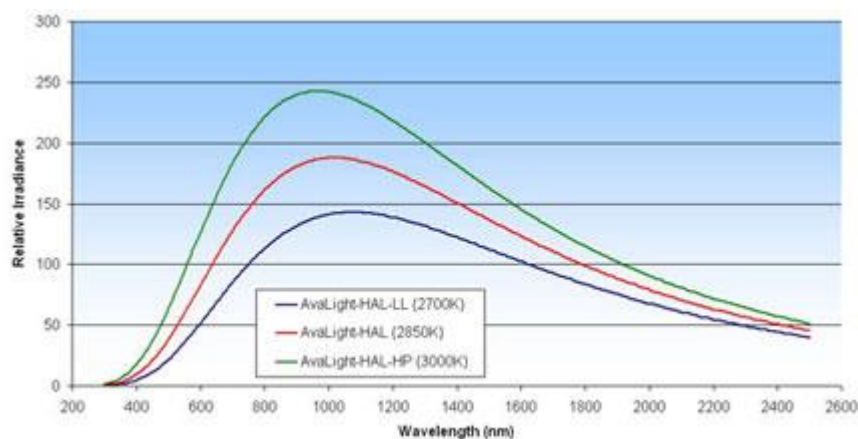


ILUSTRACIÓN 8: POTENCIA RELATIVA DE LAS TRES CONFIGURACIONES DE LA FUENTE AVALIGHT-HAL

A continuación se muestra una tabla de características de las tres posibles fuentes de luz.

	AvaLight-HAL-(s)- Mini (estándar)	AvaLight-HAL-(s)- Mini (larga vida)	AvaLight-HAL-(s)- Mini (gran potencia)
Rango de longitudes de onda	360-2500 nm		
Estabilidad	<0,1%/°C		
Tiempo de estabilización	<10 min		
Salida de la bombilla	12.0 VDC / 0.83A	10.8VDC / 0.8A	13.5 VDC / 1.0A
Tiempo de vida de la bombilla	4000h	13000h	1000h
Potencia óptica en fibra de 200 um	0.5 mW	0.35 mW	0.7 mW
Potencia óptica en fibra de 600 um	4.5 mW	3.2 mW	6 mW
Potencia óptica en fibra de 1000 um	10 mW	7 mW	14 mW

TABLA 2: TABLA DE CARACTERÍSTICAS AVALIGHT-HAL

Aunque esta fuente de luz suministra una potencia un poco mayor que la anterior sigue siendo muy reducida. Es por ello que se requerirá de una potencia mayor además de la estabilidad prolongada en el tiempo en vez de en función de la temperatura, ya que en este último caso, las variaciones habituales en el ambiente supondrán rápidas variaciones en el sistema.

2.2.2.3. HL-2000 FAMILLY

Ocean Optic es otro fabricante de equipamiento óptico para el trabajo con fibra óptica. Entre sus productos se pueden encontrar espectrómetros, fibra óptica, filtros, Sensores espectrales, y fuentes de luz.

Esta fuente de luz es únicamente halógena la cual emite en el rango de lo visible y parte del infrarrojo. Existen distintos modelos también en los que pueden haber variaciones de potencia acoplada en función de las variaciones que los diferentes modelos disponen.



ILUSTRACIÓN 9: FUENTE DE LUZ HL-2000

Esta serie de productos disponen de ventilación interna para mantener la bombilla refrigerada y modelos de esta serie incluyen conector ajustable para SMA con el fin de mejorar la potencia acoplada en cada caso. Existen modelos de mayor vida de la bombilla halógena poniendo en compromiso la potencia extraída de ella.

Dado que esta familia es extremadamente grande sólo se establecerán los datos de gran importancia suministrados por el fabricante. A continuación se muestran las características generales de la familia:

- El rango de emisión de la familia completa está entre los 360-2400 nm.
- El tiempo de estabilización es de 10 minutos
- Deriva $<0,3\%/h$
- Estabilidad de salida óptica pico-pico desde 0,15% a 0,25% en función de la potencia de la serie.
- Potencia de la bombilla desde 5 W hasta 20 W en función de la serie.
- Algunas series tienen la posibilidad de incorporar shutter con frecuencia de conmutación de hasta 2,5 Hz

La potencia acoplada por estos dispositivos se muestra a continuación

Modelo	Potencia acoplada en fibra de 600um
HL-2000	6,8 mW
HL-2000-FHSA	6,7 mW
HL-2000-LL	4,7 mW
HL-2000-FHSA-LL	4,5 mW
HL-2000-HP	8,8 mW

HL-2000-HP-FHSA	8,4 mW
HL-2000-HP-232-R	8,4 mW

TABLA 3: POTENCIA DE DISTINTOS MODELOS DE LA FAMILIA HL-2000

Los precios de estos dispositivos van desde los 530€ en el caso de la fuente más básica y ascienden hasta los 1400€ en el caso de la fuente más potente.

Existe también una familia de fuentes de luz que disponen de una bombilla de deuterio además de la bombilla halógena, pero por parte de la bombilla halógena de esta familia no se acopla potencia mayor que 1 mW por lo que no se incluyen sus características.

2.2.2.4. ALPHABRIGHT QTH LIGHT SOURCE

La fuente de luz Alfabright es una fuente de luz halógena compacta. Es la base de este proyecto ya que al sustituir la bombilla de esta una vez finalizó su vida útil se observó la simplicidad del producto pese a su elevado precio. La fuente de luz cuesta 1104€, su alimentación 69€ y cada recambio de bombilla 69€.



ILUSTRACIÓN 10: FUENTE DE LUZ ALPHABRIGHT

Esta fuente de luz, de una potencia considerable (el fabricante no da datos de potencia, pero se ha podido observar su potencia en el laboratorio), dispone de una bombilla de alta estabilidad con la cual se pretende una estabilidad temporal con el paso del tiempo. De todas maneras los gráficos que el fabricante dispone para la descripción del producto no estudian las situaciones de experimentos muy prolongados durante el tiempo, los cuales pueden ser de 3 a 8 horas o incluso de más. El comportamiento de las bombillas halógenas cuando transcurre

tanto tiempo es de una reducción propia de la potencia emitida como se ha podido estudiar en este trabajo de fin de grado.

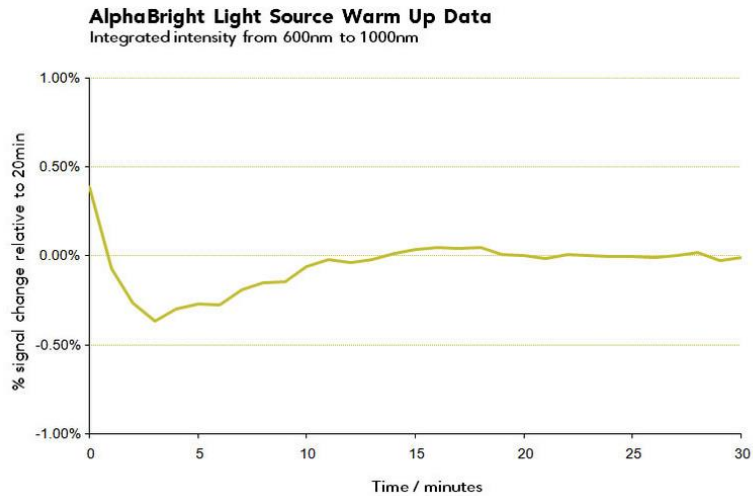


ILUSTRACIÓN 11: ESTABILIDAD DE FUENTE ALPHABRIGHT

El problema de este sistema de estabilidad es que no dispone de realimentación para un control propio de la potencia emitida lo que conlleva a que el sistema no sea consciente de la emisión que está llevando a cabo la propia fuente de luz.

El principal punto fuerte de esta fuente de luz es su tamaño reducido y caja de aluminio compacta, simplicidad y eficiencia en ciertos casos de experimentos.

2.2.2.5. STABILIZED BROADBAND LIGHT SOURCES

Estas fuentes de Thorlabs (empresa de equipamiento opto-mecánico e instrumentación óptica para laboratorio) puede ser la mejor opción de fuentes de luz blanca. Supera la carencia de estabilidad a largo plazo que tenían las demás fuentes gracias a un lazo de control que realimenta el sistema con información en tiempo real de la estabilidad del sistema, además de presentar una potencia más que envidiable.



ILUSTRACIÓN 12: STABILIZED BROADBAND LIGHT SOURCE SLS201

Este producto innovador que ha sido lanzado al mercado recientemente es la mejor opción de fuente de luz blanca además de disponer de un precio competitivo (891 € su fuente de emisión en visible y corto rango del infrarrojo y 1350€ la fuente de emisión en lo visible y en gran rango del infrarrojo).

La estabilidad en la salida se logra mediante la monitorización interna de la potencia emitida por el fotodiodo interno que implementa. Gracias a este se puede establecer el punto de trabajo o referencia sobre la cual habrá que corregir el error según las medidas obtenidas por el sensor. Con ello se consigue una mínima desviación de la potencia con el transcurso de las horas lo que evita mediciones incorrectas en los experimentos.

A continuación se muestra una tabla con las características de la fuente de luz.

	SLS201	SLS202
Rango de longitudes de onda	300-2600 nm	450-5500 nm
Pico de potencia	1000 nm	1500 nm
Estabilidad	0,05%	
Deriva por hora	0,01%	
Deriva por grados	0,1%	
Potencia de la bombilla	9 W	7,2 W
Potencia a la salida	10 mW (acoplada a fibra de 400um)	100 mW (sin acoplar a fibra)

TABLA 4: CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE DE THORLABS

El mayor inconveniente de esta fuente es la imposibilidad de regulación de su salida lo que puede suponer la saturación de ciertos espectrómetros cuando se está trabajando con pérdidas pequeñas y de esta manera la imposibilidad de obtener información de los sensores en

el laboratorio. Esta regulación de potencia por parte del usuario se incorporará en el la fuente de luz blanca a diseñar.

2.2.2.6. ASB-W-030 30W HIHG STABILITY TUGSTEN-HALOGEN LIGHT SOURCE

Sectralproducts es en este caso el fabricante de la fuente de luz halógena. Este fabricante de espectrómetros, nanocromadores, fuentes de luz y accesorios.

En este caso la fuente de luz halógena de emite entre los 300 y 2600 nm. La bombilla que la fuente incorpora es altamente estable por lo que no incorpora lazo de realimentación. La bombilla incorporada es una bombilla de 30W con la cual, mediante una lente se acopla la luz a la fibra óptica.

Lo que más llama la atención de esta fuente de luz es la independencia de la alimentación de la bombilla. La bombilla, es alimentada mediante un cable que va hasta la fuente de alimentación. De esta manera se consigue una mayor refrigeración en la bombilla halógena y no se requiere de aislamiento para la electrónica, ya que se encuentra separada.



ILUSTRACIÓN 13: FUENTE DE LUZ ASB-W-030 30W HIHG STABILITY TUGSTEN-HALOGEN LIGHT SOURCE

Esta fuente de luz es ideal para el trabajo con nanocromadores. El filamento de la bombilla está especialmente diseñado para que su emisión por unidad de área sea mayor que la de las bombillas generales.

Esta lámpara halógena permite ser variada en potencia con una regulación en corriente que dispone, lo que además de reducir la potencia varía el color de la luz emitida (más cálida o más fría).

A continuación se muestra una tabla con las características más importantes que este dispositivo implementa.

Potencia de entrada	30 W
Corriente	2,75 A
Color	3100°K
Alimentación	220 VAC 50/60 Hz 0,5 amp
Tipo de corriente de alimentación a la bombilla	DC
Regulación de corriente de alimentación de la bombilla	2,0-3,5 A
Tiempo de vida	400 h

TABLA 5: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA FUENTE DE LUZ ASB-W-030 30W HIGH STABILITY TUNGSTEN-HALOGEN LIGHT SOURCE

Aunque la fuente dispone de una regulación de corriente con al cual es posible variar la potencia de la fuente de luz, la estabilidad de la fuente de luz blanca se basa en la máxima estabilización de la corriente de salida lo que deja un lazo abierto sin realimentación lumínica. Esto supone que en el caso de haber variaciones en la potencia lumínica de salida, estas no serán asumidas por el controlador con el fin de corregirlas.

2.2.2.7. ASBN-W HIGH POWER TUNGSTEN-HALOGEN LIGHT SOURCE SERIES

Esta gama de fuentes de Spectralproducts son fuentes de gran potencia las cuales incluyen bombillas de 50W/75W/100W/150W. Están diseñadas para maximizar la potencia de salida además de contar con un regulador de potencia de salida. Sus bombillas tienen comportamientos muy próximos a comportamientos de cuerpos negros gracias al silicio depositado en las inmediaciones del filamento de la bombilla. Aunque la fuente está principalmente diseñada para el uso con nanocromadores, puede ser usada acoplado la salida a la fibra óptica aunque el fabricante no dé información sobre el acoplo a la fibra óptica lo que tendrá se ser especificado a la hora de la compra.



ILUSTRACIÓN 14: FUENTE DE LUZ BLANCA ASBN-W HIGH POWER TUNGSTEN-HALOGEN LIGHT SOURCE

A continuación se muestran las características más importantes que esta fuente de luz incorpora.

Alimentación de la fuente	85-265 VAC compatible (47-63 Hz)
Alimentación de la bombilla	12 VDC (24 en bombilla de 150W)
Corriente máxima en la bombilla	12,5 A
Regulación de la potencia de salida	0,5%

ILUSTRACIÓN 15: CARACTERÍSTICAS DE FUENTE DE LUZ ASBN-W HIGH POWER TUNGSTEN-HALOGEN LIGHT SOURCE

La vida útil es inversamente proporcional de la potencia de la bombilla y a la potencia suministrada a ella de manera que su vida irá desde las 50 hora en el caso de las bombillas más potentes (100 y 150W) y 2000 horas en el caso de las menos potentes (50 y 75).

La falta de realimentación vuelve a ser un problema a largo plazo además de sumarse la completa falta de estabilidad en la corriente de alimentación, lo que puede llevar a una fuente altamente inestable que llevaría a unas medidas muy oscilantes. En cualquier caso en aplicaciones donde se requiera de una gran potencia esta fuente puede ser de gran utilidad por su gran potencia óptica emitida.

2.2.2.8. GETLIGHT 3093 SET-TUNGSTEN HALOGEN LIGHT SOURCE FOR VIS/NIR APPLICATIONS

La fuente de luz blanca compacta que vende la empresa getAmo 3093 SET es una fuente de luz estabilizada y compacta que puede ser usada en el rango de lo visible y el infrarrojo cercano (360-2200 nm) para aplicaciones espectrométricas. Esta fuente es usada con el fin de acoplar luz en fibra óptica multimodo mediante un conector SMA. La estabilidad de esta fuente se garantiza mediante al regulación directa de la corriente.



ILUSTRACIÓN 16: FUENTE DE LUZ GETLIGHT 3093-SET

El cambio de la bombilla puede llevarse a cabo de una manera sencilla y no se requiere de mantenimiento técnico específico.

Las características más importantes se muestran en la tabla de a continuación.

Potencia de alimentación	24 VDC /1,25 ^a
Potencia a la bombilla	12-14 VDC/0,8-1,0A (10 W)
Estabilidad	0,1%
Tiempo de estabilización	15 min
Vida de la bombilla	1000 h
Potencia acoplada en fibra de 200um	0,35-0,7 mW
Potencia acoplada en fibra de 600um	3-6 mW
Potencia acoplada en fibra de 1000um	7-14 mW

TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE DE LUZ GETLIGHT 3093-SET

La fuente, además de una potencia limitada, carece de un lazo cerrado de control por lo que se repite la situación que se da en las demás lámparas que únicamente implementan la estabilidad basada en corriente. Esta fuente no permite una regulación de la potencia de salida lo que puede llegar a suponer una saturación de ciertos espectrómetros.

3. ANÁLISIS GENERAL DE LA FUENTE DE LUZ BLANCA

En este apartado se llevará a cabo un análisis de las fuentes de luz sobre el cual posteriormente se hará una propuesta de fuente. Este análisis se ha llevado a cabo tras la investigación realizada en el campo.

En primer lugar se abordará el estudio y el análisis de la parte óptica de los sistemas integrados de las fuentes de luz halógenas. Este sistema es de gran importancia en el dispositivo ya que, como se ha comentado, el sistema ha de maximizar la potencia acoplada a la fibra. La necesidad de esta elevada potencia parte de las elevadas pérdidas presentes en los sensores de fibra óptica, el cual es su principal objetivo, presentar pérdidas en función de la variable a medir.

Una vez establecido el sistema óptico se llevará a cabo el desarrollo de alimentación del sistema, teniendo en cuenta que este sistema ha de ser regulable en potencia. Con el desarrollo de este sistema de alimentación se ha de conseguir un sistema que permita establecer pequeñas variaciones de corriente con el fin de corregir los errores generados durante el tiempo de funcionamiento.

Mediante un microcontrolador se ha de llevar a cabo el control del sistema de alimentación además, será imprescindible para la realización del lazo de control del sistema. Este sistema es peculiar ya que no son abundantes las fuentes de luz que lo incorporan.

Una vez se tenga el sistema de alimentación con capacidad de ser controlado se realizará el lazo de control. Para ello se necesitará un sensor encargado de recoger los datos de la salida de la planta y el código del controlador requerido con el fin de satisfacer el requerimiento de estabilidad.

3.1. SISTEMA ÓPTICO

La base del proyecto parte del acoplo de potencia lumínica en la fibra óptica. Para ello este sistema óptico se compondrá del elemento generador de luz, los elementos encargados del acoplo de esa potencia y los de calibración del sistema óptico.

3.1.1. ELEMENTO GENERADOR DE LUZ

Es el elemento principal de la fuente de luz. Se encarga de generar la luz que posteriormente será acoplada en la fibra óptica. En este caso se empleará una bombilla halógena dada la finalidad de este proyecto, la cual es la construcción de una fuente de luz blanca en base a la tecnología halógena.

Aunque esta es una gran restricción y cierra una inmensa cantidad de fuentes de luz, la elección de una bombilla halógena dispone de distintas variables que hay que tener en cuenta, como puede ser la propia potencia de la bombilla, la cual además de la potencia lumínica generada varía la potencia en forma de calor disipada, y la propia geometría de la bombilla, factores que afectan directamente tanto a la alimentación como a la mecánica de la fuente de luz.

La potencia empleada en la bombilla va directamente relacionada con la fuente de alimentación que ha de escogerse para alimentar toda la fuente de luz desde la red. Las propias características de la bombilla establecerán el voltaje y la corriente que ha de suministrar la fuente de alimentación.

Existen infinidad de tipos de bombillas las cuales pueden organizarse por potencia, tensión de alimentación, tipo de encapsulado, orientación del filamento incandescente, etc. La elección adecuada de una bombilla puede marcar la diferencia de una fuente de luz de notable mayor o menor potencia.

Un factor a tener en cuenta es la disponibilidad de la bombilla ya que, aunque existe una gran variedad, el empleo de ciertas bombillas está más generalizado que otras. Las diferencias existentes entre mismos modelos de diferentes marcas (alineamiento o distancia del filamento por ejemplo) pueden suponer una gran pérdida de potencia. Para garantizar un mínimo de potencia se ha a trabajar únicamente con una referencia específica de un fabricante.

3.1.2. CONJUNTO DE LENTES Y REFLECTORES

Una vez generada la luz esta ha de ser adecuadamente dirigida y concentrada en el punto en el cual se encuentra la fibra óptica. Este es el objetivo de los componentes opto-mecánicos. Gracias a un sistema de lentes y de reflectores se llevará a cabo este fin.

Se han de estudiar las ventajas y los inconvenientes de los tipos de lentes a usar y estudiar además del sistema en conjunto. Distintos tipos de lentes pueden actuar de manera diferente al combinarse.

Generalmente este conjunto se compone de un reflector parabólico colocado en la parte de atrás de la bombilla que direcciona la luz hacia una lente plano-convexa. La combinación de ambas consigue un elevado acople de luz y aunque no se consigue acoplar toda la luz, sí que se consigue una potencia lumínica considerable.

Estas lentes y reflectores suelen ir montados en soportes mecanizados encargados de sostenerlos a una altura preestablecida y a la distancia necesaria para el máximo acople de luz,

que suele venir guiada gracias a los puntos focales de las lentes que el fabricante de ellas facilita. Se han de tener muy en cuenta la orientación de las lentes ya que una pequeña variación puede reducir la potencia de una manera muy notable por lo que es un trabajo esencial el adecuado ajuste de estos componentes.

3.1.3. FIBRA ÓPTICA

El conector de la fibra óptica será el punto final del sistema óptico sobre el cual se concentrará el haz de luz. Se ha de conseguir una perfecta alineación de la bombilla, sistema de lentes y reflectores, y el conector para que el dispositivo cumpla su fin principal.

Teniendo en cuenta los diferentes tipos y tamaños de fibra óptica que se pueden encontrar en el mercado la potencia acoplada dependerá de distintos factores. Principalmente dependerá del tamaño del núcleo de la fibra óptica además de su apertura numérica.

Los ensayos y pruebas se han realizado para una fibra óptica de 200um.

Cabe destacar que cualquier pequeña variación en la alineación del sistema óptico por cualquiera de los tres factores puede comprometer la potencia óptica acoplada.

3.2. ALIMENTACIÓN DE LA FUENTE DE LUZ

Se puede deducir que no existe un patrón generalizado para alimentar las fuentes de luz halógenas gracias a la posibilidad que se ha tenido de estudiar las fuentes disponibles en el laboratorio por lo que este campo queda abierto.

Con el fin de llevar a cabo la alimentación del sistema de la fuente de luz se han de valorar todas las opciones que se pueden encontrar para el equipo. Estas se han estudiado con el fin de poder llevar a cabo la fabricación de un sistema que satisfaga las necesidades y se presentan a continuación.

3.2.1. TIPO DE ALIMENTACIÓN (CORRIENTE CONTINUA O CORRIENTE ALTERNA)

La bombilla halógena ofrece la posibilidad de ser alimentada tanto con corriente alterna como con corriente continua siempre y cuando esté dentro de su rango. Gracias a ello queda abierto el debate a la alimentación que pueda usarse en este dispositivo teniendo en cuenta los puntos a favor o en contra que cada una de ellas puede suponer.

Por un lado, la tensión de alimentación de las bombillas halógenas más comunes se realiza a 12V lo que requerirá de la necesidad de una reducción de la potencia de red ya sea con un convertidor AC/DC o con un transformador de red 230/12V.

Se ha de tener en cuenta que la electrónica interna del dispositivo tiene que ser alimentada en corriente continua por lo que puede ser decisivo a la hora de diseñar el dispositivo.

3.2.2. ALIMENTACIÓN INTERNA O ALIMENTACIÓN EXTERNA

La alimentación conlleva un requerimiento elevado de espacio dentro del dispositivo por lo que existe la posibilidad de llevarla a cabo mediante una alimentación externa. Este tipo de alimentadores son comunes en el caso de la alimentación AC/DC se encargan de suministrar un voltaje con una potencia máxima, aunque también existen circuitos para la colocación interna.



ILUSTRACIÓN 17: FUENTE DE ALIMENTACIÓN EXTERNA

No se da este caso en la alimentación AC pero sí que existen alimentadores más compactos que pueden insertarse dentro del sistema como pueden ser los alimentadores convencionales para hogar de bombillas halógenas o fuentes integradas de regulación en alterna.



ILUSTRACIÓN 18: FUENTE DE ALIMENTACIÓN CONMUTADA INTERNA (ALIMENTACIÓN DE BOMBILLAS HALÓGENAS PANELES DOMÓTICOS UPNA)

Se muestran de esta manera diversas posibilidades que se tienen para la alimentación de la fuente de luz.

3.3. ELECTRÓNICA DIGITAL

La incursión de un microcontrolador dentro de la fuente de luz halógena es un concepto poco habitual en estos dispositivos aunque no completamente innovador.

La electrónica habitual en estos dispositivos es la electrónica de alimentación y regulación analógica de la bombilla halógena dejando de lado en la inmensa mayoría de los casos, la electrónica digital. Gracias a esta se pretende conseguir un procesado de datos y mayor control en la estabilidad de la bombilla halógena, gracias a la realización de un lazo cerrado en potencia lumínica emitida por la bombilla halógena.

Además, con el empleo de diversos actuadores sobre el sistema, se pretende dar la posibilidad al usuario de establecer un control directo sobre la fuente de luz, de manera que pueda regular la potencia en la salida.

Para conseguir los propósitos de este campo, se requerirá de un dispositivo de regulación de la alimentación de la bombilla halógena que sea capaz de comunicarse y obedecer al microcontrolador encargado de su control, además de los sensores pertinentes para la obtención de datos internos del propio dispositivo los cuales serán utilizados en su lazo de control.

Dentro de los microcontroladores que pueden ser usados se presentan diferentes opciones debido al gran mercado que se presenta, ya sean Arduinos cada vez más

estandarizados, PICs habituales en el sector de la industria u otras muchas casas de microcontroladores.

3.4. ESTRUCTURA Y APARIENCIA EXTERNA

La apariencia externa de las fuentes de luz halógenas es un factor que se ha de tener en cuenta también. Aunque se trata de un instrumento de laboratorio y su funcionalidad es fundamental, el atractivo estético es un valor añadido que puede ser de estudio para posteriores versiones de la fuente.

Aunque se disponen de herramientas digitales de diseño y desarrollo de una estructura atractiva, no se disponen de medios físicos para una fabricación funcional por lo que este campo no será directamente abordado. No obstante, sí que se tendrá en cuenta la máxima reducción del tamaño del dispositivo de manera que se dé lugar a un sistema completamente integrado.

3.5. VENTILACIÓN Y REFRIGERACIÓN

En un dispositivo cuya base es el calentamiento de un filamento hasta que emita en longitudes de onda de lo visible, será requerida una ventilación adecuada que se encargue de refrigerar y evitar el colapso de los dispositivos internos, la manipulación del dispositivo y, en el caso de la realimentación, la veracidad de los datos de los sensores debido a variaciones térmicas en los componentes internos.

Para ello es habitual contar con ventiladores y, en algunos casos, aletas para facilitar la refrigeración del dispositivo. Se requerirán también aperturas que pongan en contacto el interior de la caja con el exterior creando así un flujo de aire que se encargue de trasladar el calor generado en el interior, al exterior.

El propio material de la caja donde se encontrará el dispositivo puede ayudar a mejorar la ventilación también por lo que es habitual el empleo de cajas de aluminio.

Dado que además la electrónica interior del dispositivo puede ser sensible a perturbaciones de calor se puede implementar aislamiento lumínico con el fin de proteger los elementos más sensibles del sistema electrónico y que pueden verse sometidos a grandes variaciones cuando son sometidos a temperaturas elevadas. Evitando una radiación directa sobre estos elementos deseados se puede conseguir una reducción directa de la temperatura en el componente y evitar así un rango de trabajo donde el elemento se encuentre en riesgo. Los elementos que menor temperatura de trabajo permiten son los condensadores electrolíticos que permiten una temperatura máxima de trabajo de 85°C aunque con una ventilación adecuada se puede evitar esta circunstancia.

4. PROPUESTA DE FUENTE DE LUZ

En este apartado se explicará la fuente de luz blanca que se quiere llevar a cabo, de forma detallada y explicando las decisiones tomadas a lo largo del desarrollo de la misma.

4.1. ÓPTICA Y OPTO-MECÁNICA

El primer paso del proyecto debe ser obtener la capacidad de acoplar cierta potencia a la fibra óptica. Esto pasa por la creación de una estructura manejable que permita una sencilla calibración que pueda ayudar a establecer una configuración de lentes capaz de suministrar la máxima potencia en la fibra. Una vez se sea capaz de acoplar suficientemente potencia se procederá al diseño eléctrico-electrónico del dispositivo.

Para llevar a cabo esta estructura sobre la que posteriormente se trabajará se deberán estudiar los dos campos: Óptica y opto-mecánica.

4.1.1. ÓPTICA

Como se ha mencionado anteriormente, con la óptica se ha de tratar de acoplar la máxima potencia lumínica emitida por un cuerpo que se comporta como un emisor que emite casi de una manera difusa. Con la ayuda de reflectores y lentes se ha de estudiar la mejor opción de acople de luz además de las distintas configuraciones de lentes que puedan garantizar una potencia razonable.

4.1.1.1. BOMBILLA

Aunque la elección de una bombilla parezca sencilla existen muchos factores que se han de tener en cuenta a la hora de seleccionarla.

La principal consideración que se ha de hacer es que no se comporta como un cuerpo difuso. Considerando que el filamento tiene forma de bobinado, las diferentes configuraciones de filamento, así como la orientación del mismo, pueden suponer una mayor o menor emisión de luz en ciertas direcciones, lo que llevará a su vez a un mayor o menor acoplo de luz.

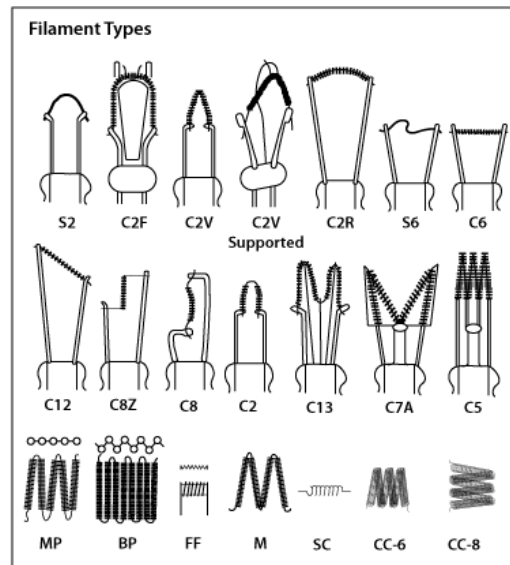


ILUSTRACIÓN 19: CLASIFICACIÓN DE FILAMENTOS

Se ha de establecer el filamento de manera que se genere la máxima potencia lumínica a lo largo del eje donde se establecerán las lentes y los reflectores. Con el fin de garantizar el mayor acoplo de potencia en este caso se utilizará una bombilla con filamento FF, que es el filamento que mayor potencia genera en el menor tamaño posible. Gracias a éste se podrá desarrollar una configuración la cual implique una menor área de emisión y mayor similitud a un punto que emite de manera difusa a lo largo de las inmediaciones de ese eje. Una vez realizada esta aproximación se puede partir al estudio de la óptica considerando la bombilla como un foco de emisión.

Philips, entre muchos otros productos que ofrece, dispone de una gama de bombillas halógenas con la que se ha trabajado. Dentro de esta gama cabe destacar las tres principales bombillas con las que se ha trabajado de referencia 7027, 7023 y 13189 que disponen de potencia de 50W y 100W. Debido a la propia forma de la bombilla se ha de tener en cuenta que esta implicará un sistema óptico u otro. El empleo de una bombilla de precio reducido y de disponibilidad elevada es una ventaja para la fuente de luz como se ha mencionado anteriormente.

**ILUSTRACIÓN 20: PHILIPS 7027****ILUSTRACIÓN 21: PHILIPS 7023****ILUSTRACIÓN 22: PHILIPS 13189**

4.1.1.2. REFLECTORES

Aunque existen bombillas que los incorporan (es el caso de la bombilla 13189), generalmente estos suelen reflejar menos potencia que la que pueda reflejar un reflector especializado para el trabajo con material óptico como los que son adquiribles en los distintos vendedores (EdmundOptics, Thorlabs, etc.). Además generalmente estos reflectores no se emplean con el fin de concentrar la luz sino únicamente con el de direccionarla hacia un hemisferio.

Con un reflector se conseguirá acoplar la luz emitida en el sentido contrario al cual se encuentra la fibra óptica, por lo que ha de ser un componente a tener en cuenta.

En el caso de los reflectores incorporados en las bombillas se ha de estudiar cuál es su comportamiento ya que la apertura, curvatura del reflector o incluso la orientación de la bombilla puede implicar un comportamiento diferente.

Estudiando la bombilla adquirida (Philips 13189) se puede observar que el reflector tiene forma parabólica y funciona de manera que los haces de luz emitidos por la bombilla son paralelos, pero se ha de tener en cuenta que sobre el eje de emisión la potencia no es directa ya que la propia bombilla obstaculiza la emisión sobre su componente vertical. Se ha de tener en cuenta que esto llevará a la inserción de lentes de mayor tamaño lo que implicará un mayor tamaño y precio de la opto-mecánica.

Por otro lado existe la posibilidad de inserción de reflectores parabólicos comerciales de diferentes distribuidores. Estos reflectores de mejor calidad permiten reflejar una mayor potencia pero se ha de tener en cuenta que habrá diferentes factores que afectarán como las dimensiones del mismo o su distancia focal, las cuales generalmente suelen ir unidas. El hecho de implementar reflectores de gran tamaño puede requerir de un tamaño mayor de la opto-mecánica.

Un reflector parabólico se encarga idealmente de reflejar de manera paralela toda la luz generada desde un foco, o como se denomina en la óptica, generar un foco en el infinito. Con ello, gran parte de la luz emitida en sentido contrario puede ser dirigida hacia la fibra óptica. La distancia focal del reflector indica la distancia a la que el foco tiene que estar situado con el fin de que la reflexión sea óptima.



ILUSTRACIÓN 23: REFLECTOR CM127-010-G01

La combinación bombilla y reflector independientes es la opción que más se ha podido estudiar debido a la disponibilidad de este tipo de fuentes en el laboratorio. Tras la comprobación de los mejores resultados de esta combinación se ha decidido centrarse en esta configuración.

Dentro de los fabricantes de reflectores se ha seleccionado Thorlabs debido a su precio reducido y disponibilidad de soportes para sus productos. Teniendo en cuenta los parámetros que pudieran afectar al sistema se ha seleccionado un diámetro del reflector de $\frac{1}{2}$ ". Aunque se dispone de menor área de reflexión, su distancia focal de 9.5mm es la menor de todas lo que además de evitar una mayor dispersión en la luz permitirá desarrollar una configuración de menor tamaño.

4.1.1.3. LENTES

Aunque se ha estudiado la opción de implementar colimadores para maximizar la potencia en la fibra, debido a su elevado coste se ha decidido basar la configuración únicamente en lentes planoconvexas convencionales.



ILUSTRACIÓN 24: LENTE LA15140

Con estas lentes se puede llevar a cabo una adecuada manipulación de la luz partiendo de un foco y llevándola al punto deseado. La propia estructura de la lente plano-convexa permite el trabajo tanto con focos de luz como con haces de luz paralelos por lo que es la mejor opción para el trabajo con la luz generada en el filamento (foco) y con la luz reflejada en el reflector (foco en el infinito, paralela). Es necesario el empleo de lentes de cristal para evitar efectos por la temperatura y que permitan una transmisión de longitudes de onda dentro de lo visible. Dentro de las lentes de cristal las plano-convexas son las más económicas y es por ello que se han elegido para este fin.

La propia configuración en el sistema de la lente plano-convexa puede suponer una variación de potencia en función hacia qué lado se dirija la parte plana y la parte esférica. En una configuración se consigue un punto focal único mientras en otra configuración se consigue un

punto focal más distribuido y más difuso. Aunque idealmente la idea de un único punto focal puede ser de gran interés debido al máximo acoplo que esto puede suponer, el trabajo práctico con ese punto focal puede suponer una gran complicación en un sistema de lentes móviles por lo que en este proyecto se ha trabajado con una distancia focal distribuida. Esta configuración, además, puede beneficiar a la propia emisión de la bombilla, la cual como se ha mencionado se puede simplificar a un foco aunque no lo sea.

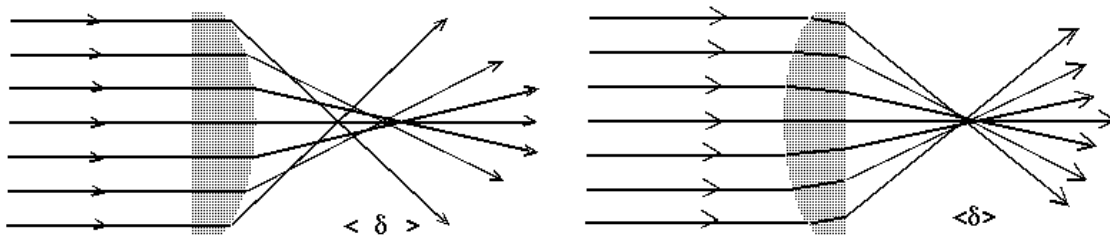


ILUSTRACIÓN 25: CONFIGURACIONES LENTE PLANO CONVEXA. PRIMERA DISTANCIA FOCAL DIFUSA. SEGUNDA DISTANCIA FOCAL ÚNICA

La primera combinación que se plantea es con una única lente, la cual actuará tanto para los rayos provenientes desde el foco (los más intensos) como para los rayos provenientes desde el reflector (desde el infinito y no tan potentes debido a que no actúa sobre el eje principal del sistema óptico). Con este sistema óptico el cual implementan la mayoría de fuentes de luz halógenas comerciales se es capaz de acoplar una potencia relativamente elevada, pero se ha de tener en cuenta que este sistema óptico no es el más adecuado para dos focos de luz (foco a distancia focal y en el infinito). Este sistema se llevará a cabo gracias a una lente de $\frac{1}{2}$ " que suministra Thorlabs. También se disponen de soportes para estas lentes en la misma web lo cual evitará la necesidad de mecanizado de un soporte específico como se verá en el apartado de la estructura opto-mecánica. Con el fin de aumentar la potencia acoplada se plantea otra opción de combinación de lentes.

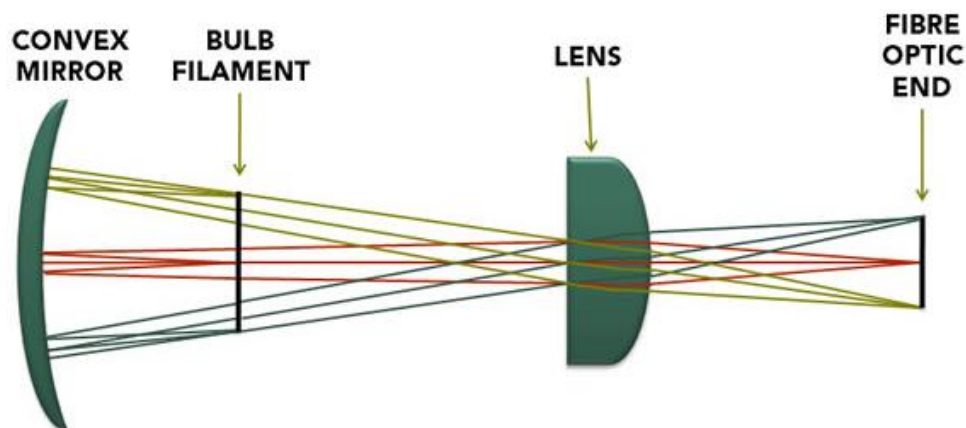


ILUSTRACIÓN 26: SISTEMA ÓPTICO UNO (ALFABRICHT.COM)

Esta segunda combinación dispone de dos lentes plano-convexas en serie las cuales actuarán como una única lente biconvexa. La implementación de dos lentes plano-convexas permite una mejor manipulación de la luz proveniente de los dos focos además de una posibilidad de mayor calibración como se verá más adelante. Gracias a este sistema es posible acoplar un 50% más de potencia experimentalmente. Esto es debido a la manipulación directa que se hace sobre la luz emitida por el foco de luz principal (filamento). Esta combinación de lentes es por lo tanto la configuración que se seguirá a lo largo del proyecto para acoplar la luz. Para esta segunda configuración será necesaria la implementación de una lente más con las mismas características que la anterior.

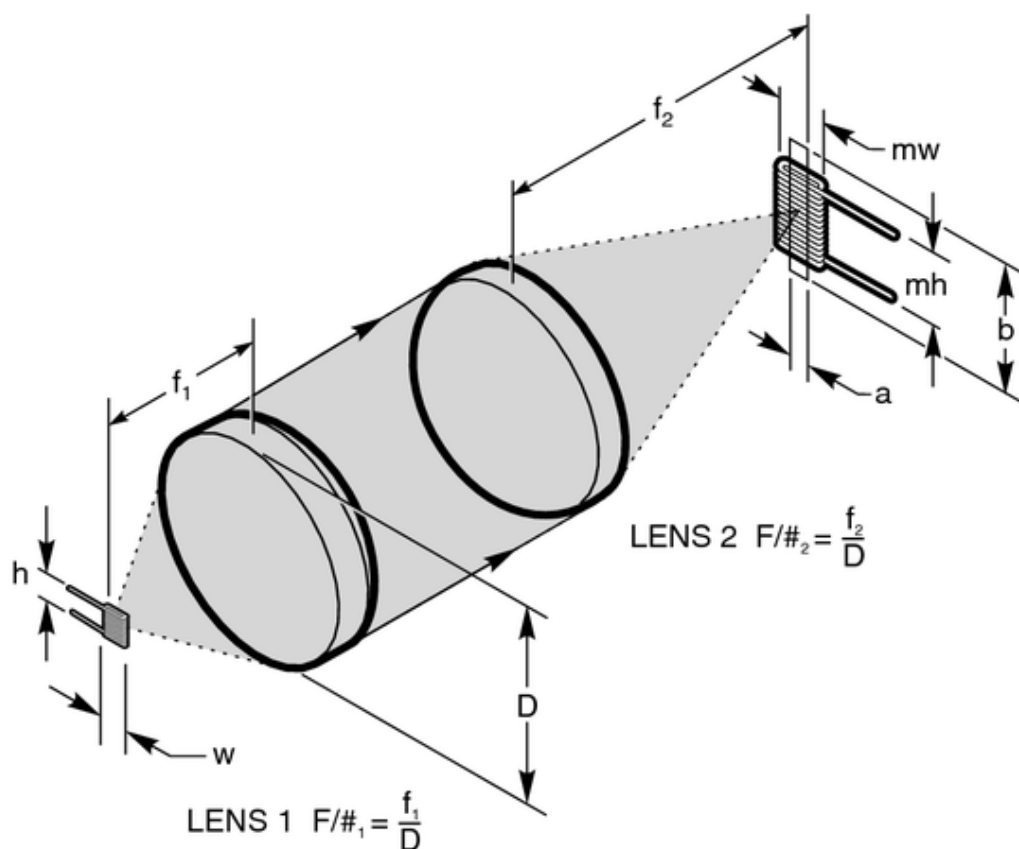


ILUSTRACIÓN 27: SISTEMA ÓPTICO 2, DOS LENTES PLANOCONVEXAS

4.1.1.4. FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica el punto donde ha de converger la máxima potencia posible del foco de luz. Es para eso para lo que se emplea la óptica descrita anteriormente. La fórmula general de la potencia acoplada a la fibra óptica se muestra a continuación y se presentan los dos factores que hay que estudiar en ella para el acoplo de potencia.

La potencia acoplada viene definida por:

$$\begin{aligned}
 P &= \int_{A_f} \left[\int_{\Omega_f} B(A_s, \Omega_s) d\Omega_s \right] dA_s \\
 &= \int_0^{r_m} \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} B(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right] d\theta_s r dr \\
 &= \int_0^{r_s} \int_0^{2\pi} (2\pi B_0 \int_0^{\theta_{max}} \cos \theta \sin \theta d\theta) d\theta_s r dr \\
 &= \pi B_0 \int_0^{r_s} \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta_{max} d\theta_s r dr \\
 &= \pi B_0 \int_0^{r_s} \int_0^{2\pi} NA^2 d\theta_s r dr \\
 P &= \pi^2 r_s^2 B_0 (NA)^2 \approx 2 \pi^2 r_s^2 B_0 n_1^2 \Delta
 \end{aligned}$$

Los factores principales que afectan al acople de la potencia son por un lado el diámetro del núcleo de la fibra óptica y la apertura numérica de la misma. Cuanto mayor sea el área por la cual se introducirá potencia a la fibra mayor será la potencia acoplada a la misma, por lo que el acople de potencia dependerá del cuadrado del diámetro de la fibra. Por otro lado tenemos la apertura numérica, que es un número adimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema óptico, en este caso la fibra óptica, acepta luz. Aunque también está relacionado con la salida de la luz de la fibra óptica no se tendrá en cuenta en este caso. El ángulo de aceptación se denomina al ángulo máximo que implica que el rayo de luz quede atrapado en las paredes de la fibra óptica. Las fibras multimodo guían la luz emitida en un determinado cono delimitado por este ángulo además del índice de refracción de la cubierta. Es el producto del índice y el seno de ese ángulo a lo que se le denomina apertura numérica y el acople de potencia a la fibra óptica depende del cuadrado de este factor.

Gracias a la dependencia de estos dos factores se puede estudiar teóricamente el acople de luz en función del diámetro y la apertura numérica lo que lleva a disponer datos de la potencia acoplada en la fibra óptica para distintos tipos de fibra. Con ello se puede llevar una comparación de potencia con la que está siendo acoplado en el caso de esta fuente de luz y en el caso de fuentes de luz comerciales actualmente en venta.

4.1.2. OPTO-MECÁNICA

Casi tan importante como la óptica implementada en el dispositivo es la estructura sobre la cual se monta ya que una inadecuada posición de las lentes y reflectores puede suponer una pronunciada caída de potencia. Se ha de llevar una cuidadosa calibración de los elementos del sistema óptico desde la bombilla hasta el propio conector de la fibra óptica ya que la potencia dependerá del adecuado ajuste.

4.1.2.1. SOPORTE DE CALIBRACIÓN

Dado que se ha de evitar el mínimo desajuste en los elementos que componen el sistema opto-mecánico se llevará a cabo en un perfil que actúe como carril sobre el cual se puedan colocar los diferentes soportes. Con el fin de satisfacer este requerimiento se ha partido por la implementación del sistema opto-mecánico sobre perfiles extruidos Bosch. Estos perfiles permitirán establecer una calibración tanto a lo largo del eje de luz como sobre el eje vertical de cada soporte.

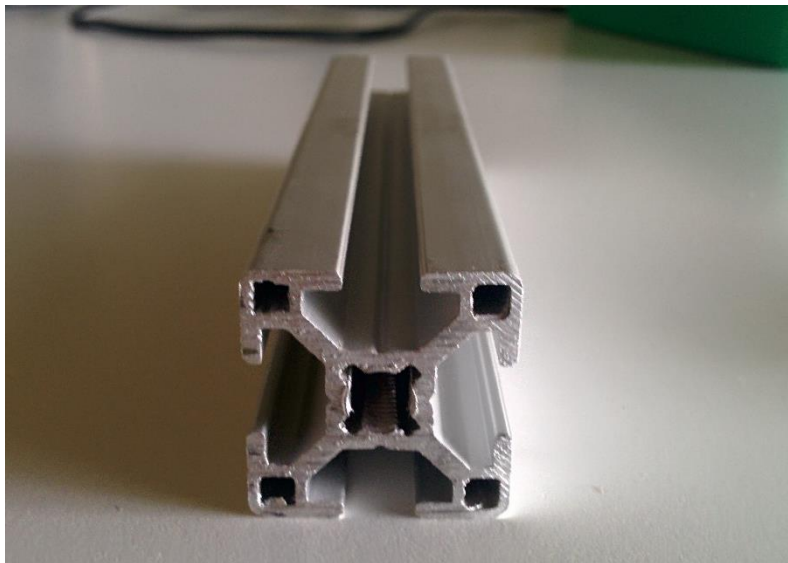


ILUSTRACIÓN 28: PERFIL 1



ILUSTRACIÓN 29: PERFIL 2

Inicialmente la construcción del soporte base de calibración se lleva a cabo para estudiar el acoplo de potencia en la fibra óptica en función de la disposición de los siguientes elementos, pero dado el gran catálogo de perfiles extruidos existente se ha decidido emplear estos como base de calibración final con el objetivo de reducir costes de mecanizado que pudieran suponer otras bases.

Aunque el perfil 2 técnicamente no es perfil Bosch sino que corresponde otra marca, en el catálogo oficial de perfiles Bosch existe un perfil semejante, de dimensiones más pequeñas que puede ser empleado de la misma manera y con las mismas funciones que el perfil elegido. En el caso de existir problemas de espacio siguen existiendo perfiles 20x60 de otros fabricantes del Tipo-I como el que se muestra en la figura.

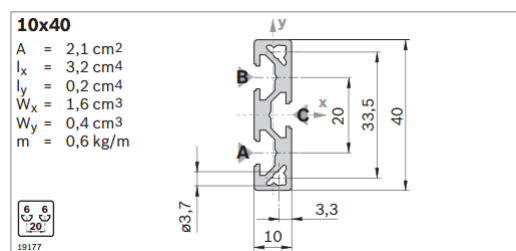


ILUSTRACIÓN 30: PERFIL CATÁLOGO BOSCH

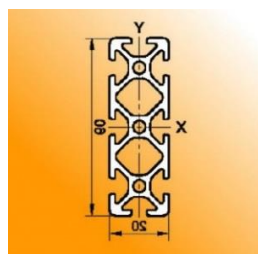


ILUSTRACIÓN 31: PERFIL 20X60 TIPO-I

4.1.2.2. SOPORTE DE LENTES Y REFLECTORES

Como se ha mencionado anteriormente el propio fabricante Thorlabs donde se han adquirido las lentes y reflectores dispone de soportes para estos. Estos soportes están diseñados para ser fijados mediante un tornillo al orificio deseado pero dado que se requiere de movilidad en estos soportes se ha de diseñar un soporte capaz de verse sometido a estas situaciones.

Los soportes iniciales, con el fin de ser sencillos y que cumplan su fin de calibración se han diseñado mediante herramientas de CAD (SolidWorks) con el fin de que sean producibles en la impresora 3D del laboratorio.

El diseño, trabajo e implementación de estos soportes es algo que no requiere de demasiado tiempo por lo que es la mejor opción para el estudio inicial de la óptica y establecer una calibración inicial. Estos soportes a medida pueden implicar un rozamiento elevado sobre el perfil para una primera fijación de los soportes opto-mecánicos pero el hecho de estar contruidos mediante PLA o ABS los hace susceptibles a temperaturas elevadas lo que implicará un diseño final de estructuras basadas en aluminio.

Las estructuras de aluminio aparte de soportar temperaturas más elevadas y presentar mejor funcionamiento a lo largo de los ensayos permiten la posibilidad de una fijación definitiva mediante las piezas estandarizadas para los perfiles extruidos. Mecanizando una placa de aluminio con dos orificios es posible ser capaz de diseñar un perfil metálico funcional sobre el cual sea fácilmente acoplable el soporte comercial de Thorlabs.

Aunque el propósito final para el proyecto es el diseño de unos soportes funcionales a medida mediante herramientas de CAD (SolidWorks) se ha decidido aplazarlo dado el incremento de presupuesto que supone la realización de piezas mecanizadas.

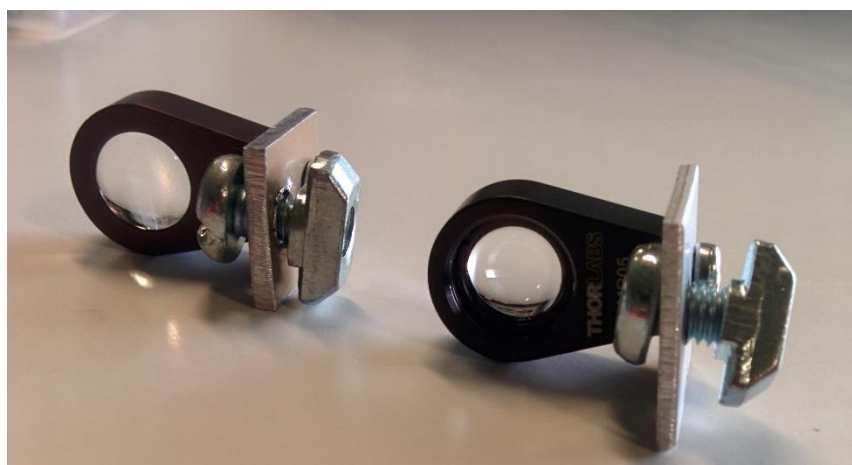


ILUSTRACIÓN 32: LENTES Y SOPORTES PARA LENTES CON LA ESTRUCTURA DE FIJACIÓN

4.1.2.3. SOPORTE PARA FIBRA ÓPTICA

Aunque en el diseño final integra el conector para la fibra irá en la propia caja que contenga la fuente de luz, para las pruebas iniciales se requiere de un soporte el cual esté en el perfil empleado como soporte de calibración con el fin de que se pueda estudiar también la distancia a la cual se acopla mayor potencia en la fibra óptica. De la misma manera que el caso anterior se ha diseñado un soporte para el conector de la fibra óptica de manera que se pueda llevar la adecuada calibración tanto longitudinal como en altura. Este soporte impreso se usará hasta que se integren la caja y el conector se sitúe en un orificio de esta.

A continuación se muestra un conjunto provisional desarrollado previo a ser integrado en una caja.

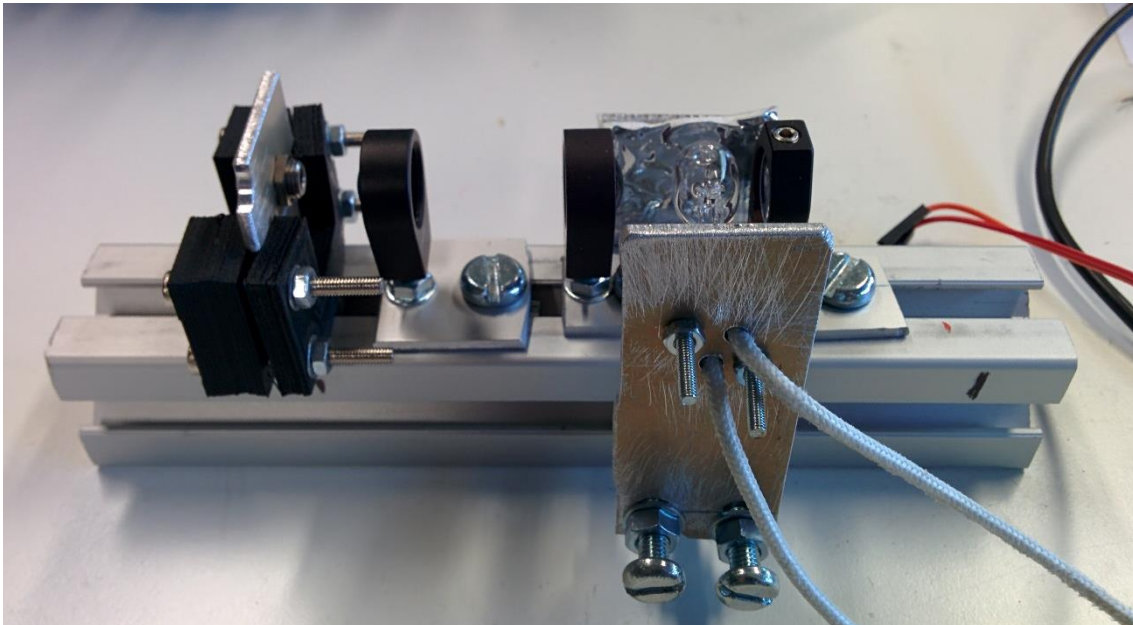


ILUSTRACIÓN 33: SISTEMA ÓPTICO PREVIO A INSERCIÓN EN LA CAJA

4.1.2.4. CAJA

Aunque no forma parte de la estructura opto-mecánica, la caja afectará evidentemente a las dimensiones de la estructura completa. Tanto en altura, anchura y longitud de la caja vendrán dependerán de a opto-mecánica, que será la estructura de mayor tamaño que se integre en el dispositivo.

Se busca la máxima reducción de la caja de manera que se tenga un dispositivo compacto pero se ha de tener en cuenta la inserción posterior de la electrónica, ventilación y mandos de control delanteros.



ILUSTRACIÓN 34: SISTEMA ÓPTICO DENTRO DE CAJA

4.1.3. CALIBRACIÓN

La calibración o ajuste de las lentes es uno de los puntos más críticos del sistema óptico. Se ha de llevar a cabo siempre que se quiera obtener una medición en potencia máxima acoplada a la fibra y únicamente de ello depende la potencia acoplada siempre y cuando el resto de componentes del sistema opto-mecánico estén adecuadamente diseñados. En este apartado se mostrará la guía que se ha de seguir con el fin de lograr una potencia mínima considerable. Siguiendo esta guía de calibración se será capaz de realizar la calibración tantas veces como se requiera antes de fijarla además de cómo llevar a cabo esa fijación. Esta guía se ha desarrollado tras muchos intentos de una calibración adecuada con el fin de poder seguir unos patrones que aseguren este mínimo de potencia. Se requerirá, además de todo el material óptico y opto-mecánico, un medidor de potencia acoplada a fibra. En este caso ese medidor de potencia ha sido el medidor Ophir Smart Head to USB interface.

Guía de calibración:

1. El primer paso es la fijación del soporte de la bombilla de manera que el filamento quede a una distancia de 70 milímetros del conector. Esta distancia permitirá el trabajo adecuado con los soportes y garantizará un elevado acoplo de potencia. La fijación debe ser lo más consistente posible ya que no se deben permitir variaciones en esta durante la calibración.
2. Tras la fijación del soporte de la bombilla se ha de colocar esta (es conveniente el empleo de guantes para evitar que la bombilla halógena se funda).

3. A continuación se han de colocar las dos lentes, que serán las que acoplen la mayor parte de la potencia en la fibra. Estas se colocarán con la parte plana enfrentada de manera que las partes convexas den al conector de la fibra y al filamento de la bombilla. Se han de colocar a la distancia de 15 milímetros que es la distancia focal de estas lentes y lo más perpendicular posible al eje sobre el cual viajará la luz.
4. Ahora, sin haber fijado las lentes se ha de observar que al mirar por el agujero del conector de la fibra el filamento de la bombilla está situado en el centro. Si no es así se ha de corregir la posición de la bombilla (el propio conector tiene una holgura que puede afectar a la altura del filamento que habrá que corregir) y la alineación de las lentes (aunque finalmente las lentes no se encuentren completamente perpendiculares el acople de potencia puede ser mayor que en el caso de que sí lo estén) de manera que finalmente la imagen del filamento quede perfectamente situada en el centro del conector. Este método, fundamentalmente empírico, es altamente eficaz para mejorar la potencia acoplada por lo que se recomienda llevarlo a cabo.
5. Tras una primera calibración ahora se llevará a cabo una segunda en la cual se trabajará con el medidor de potencia Ophir. Tras fijar la fibra en el conector se ha de tratar de conseguir un máximo de potencia acoplada mediante variaciones muy pequeñas en las dos lentes tanto en el eje longitudinal y el en giro perpendicular al eje. Con el fin de proteger la vista del operario es conveniente disponer de alguna pequeña estructura que evite la luz incida directamente en los ojos del operario encargado de la calibración (con una chapa de aluminio doblada en forma de U será suficiente). Una vez se observe que se ha alcanzado la potencia máxima al mover una lente se procederá a mover la siguiente hasta que se alcance una potencia superior. Tras esto se recomienda volver a la anterior y realizar una iteración como mínimo del proceso. En el caso de realizar grandes movimientos en las lentes y no conseguir un máximo considerable de potencia se recomienda realizar el punto 3 y 4 otra vez ya que los puntos de máxima potencia se encuentran en las proximidades de la distancia focal y con el enfoque realizado en el punto 4.
6. Tras observar el máximo de potencia en las lentes se ha de colocar el reflector. Este ha de ser situado a su distancia focal con el lado reflectante en dirección al filamento. El empleo del reflector supone un aumento de potencia entorno al 10 o 20% y el procedimiento será similar al del punto 5, realizando pequeñas variaciones longitudinales y giro perpendicular sobre el eje. Cuando se perciba que se ha

logrado el máximo de potencia la calibración del reflector la calibración habrá concluido.

Guía de fijación:

1. Se ha de tener en cuenta que la fijación será definitiva, es casi imposible y nada recomendable intentar llevar una fijación provisional con el máximo de potencia. A la hora de apretar los tornillos fijadores de los soportes es casi imposible no realizar mínimas variaciones de posición sobre estos, cosa que comprometerá la potencia acoplada de manera directa. Cuando se quiere fijar la potencia máxima se ha de tener en cuenta si el montaje será sometido a variaciones, y si lo va a ser es recomendable realizarla de manera posterior.
2. Una vez tomada la decisión de realizar la fijación final se ha de llevar a cabo la guía de calibración en el caso de que no se haya realizado.
3. Una vez finalizada la guía de calibración se han de fijar los soportes mediante pegamento que actúe adecuadamente en el aluminio. Es aconsejable realizar esta acción depositando gotas en los bordes del soporte. Se ha de dejar secar las horas que hagan falta para que los soportes estén fijos y listos para el siguiente paso. Es importante no realizar pruebas que supongan el encendido de la bombilla mientras se esté realizando esta acción ya que la temperatura puede afectar en el pegamento ya sea en su fase de sacado como en él ya seco.
4. Una vez hayan transcurrido las horas necesarias para su secado se ha de llevar a cabo la fijación de los soportes con los tornillos. Si el pegamento ha actuado bien a la hora de apretarlos no se realizarán variaciones en la posición de los soportes y no se comprometerá la potencia de la fuente de luz y se alcanzará una fijación final.
5. De manera opcional se puede emplear fijador de tornillos para evitar posibles movimientos de calibración en las lentes aunque no sea del todo necesario.

NOTA: Hay que recordar que la fijación es definitiva y no será susceptible a cambios futuros. Se recomienda llevarla a cabo tras el ensamblaje del dispositivo completo y prescindir de ella en situaciones provisionales.

Cambio de bombilla:

1. Para realizar el cambio de bombilla se ha de extraer cuidadosamente la bombilla en mal estado sin interferir con el resto de los elementos del sistema óptico y optomecánico. Aunque los elementos se encuentran fijados y no se pueden mover,

cualquier interferencia con la óptica (ensuciar o dañar) puede suponer una pérdida de potencia que requerirá el cambio de la lente o del reflector.

2. Una vez extraída la bombilla, se ha de introducir una bombilla nueva en el orificio. Como en el caso de la calibración el empleo de guantes con el fin de evitar depositar suciedades en la bombilla halógena. Es muy importante emplear el tipo de bombilla indicado en la caja (Philips Projection Lamp Type 7027) ya que el empleo de otra bombilla halógena no garantiza potencia debido a la alineación.
3. Una vez insertada la bombilla se ha de verificar que ha sido colocada correctamente mirando por el orificio del conector de la fibra. En el caso de que el filamento no esté completamente centrado se ha de corregir su posición para aumentar la potencia. Para ello el método más eficiente es asegurarse que el filamento está correctamente posicionado en el centro del eje mirando por el conector de la fibra. Cuanto más centrado esté el filamento de la bombilla, más potencia se acoplará en la fibra óptica.
4. Es posible utilizar algún medidor de potencia acoplada con el fin de mejorar la potencia acoplada teniendo en cuenta que se ha de enfriar la bombilla antes de ser movida. Los movimientos en este caso han de ser mínimos y rondan la posición lograda en el punto 3.

NOTA: Siguiendo estos pasos se puede lograr la potencia inicial después de un cambio de bombilla. No se garantiza la potencia en el caso de no seguir estos pasos.

Gracias al empleo de estas guías se ha conseguido la potencia actual en la fuente de luz blanca. Esta guía se ha llevado a cabo para seguir un patrón establecido de pasos sencillos los cuales se han llevado durante la realización de este proyecto.

4.2. ALIMENTACIÓN

Se han estudiado las diferentes opciones anteriormente mencionadas de alimentación para finalmente integrar un tipo de ellas. A continuación se llevará a cabo un análisis de las distintas opciones.

Por un lado se ha estudiado el tipo de alimentación (corriente alterna y corriente continua). Tras pruebas de potencia con un transformador 220/12 y con alimentadores para bombillas halógenas se ha observado una pérdida de esta al ser alimentadas por corriente alterna. Esto es debido a que el valor eficaz de la alimentación es ligeramente inferior a 12V lo que hace imposible el trabajo en regiones próximas al máximo de potencia. El control de este tipo de alimentación se debería llevar a cabo mediante tiristores. Estos dispositivos son capaces

de activar la tensión cuando se encuentra en cualquier punto de la onda pero son incapaces de cortar, por lo que habrá que esperar su paso por cero. Son fácilmente controlables con un microcontrolador pero presentan como inconveniente que la alimentación del microcontrolador que es en corriente continua. En el caso de la alimentación comercial para bombillas halógenas domésticas la activación y desactivación de los tiristores puede suponer una inestabilidad en esta alimentación y de esta manera la incapacidad de ser controlada y alimentar de una manera estable. Por ello se ha llegado a la conclusión que el dispositivo será de mejores características si se desarrolla únicamente alimentado en corriente continua, que permitirá un control directamente relacionado con el voltaje y la corriente de alimentación.

Por el otro lado tenemos la elección de alimentación interna o alimentación externa. Existen alimentaciones en corriente continua de las dos clases y habrá que considerar las dos opciones que se disponen. En el caso de la alimentación externa se está hablando de alimentadores comerciales en función del voltaje y de la potencia como se muestra en la imagen inferior.



ILUSTRACIÓN 35: ALIMENTADOR EXTERNO CONMUTADO GSM60A12-P1J

Estos alimentadores completamente estandarizados permiten una alimentación en corriente continua sencilla. El propio dispositivo se encarga de establecer la tensión de salida y es capaz de suministrar corriente hasta el máximo de su potencia. El problema reside en la realimentación en corriente que estos dispositivos tienen. Una demanda variable de corriente puede inestabilizar la fuente de alimentación y llevarla a un comportamiento pulsado.

Las alimentaciones internas son capaces de rectificar la señal alterna y dar una salida regulada en tensión. Mediante el control de una salida de control se puede ajustar el voltaje de salida y establecer el deseado. Estos dispositivos presentan como desventaja su gran tamaño y

precio. Además de tener unas dimensiones que afectarán al tamaño del dispositivo la inserción de la alimentación interna supondrá un incremento considerable del precio del dispositivo. Con el fin de evitar estas dos desventajas del empleo de las fuentes de alimentación interna se elegirá la opción externa.



ILUSTRACIÓN 36: ALIMENTADOR INTERNO TRACO POWER

Mediante una fuente de alimentación externa de 12V y 60W se podrá llevar a cabo la alimentación tanto como para la bombilla seleccionada como para la electrónica interior con un margen de potencia lo suficientemente grande para alimentar la electrónica y la refrigeración del dispositivo. Se han de tener en cuenta las limitaciones de esta fuente, evitarlas o solucionarlas mediante otros elementos.

4.3. CIRCUITO DE CONTROL DE LA POTENCIA DE LA FUENTE DE LUZ

En este apartado se verá cómo se llevará a cabo la gestión de alimentación de la fuente de luz halógena, que se encargará de la estabilidad como de la regulación de la fuente de luz. Este apartado es clave en el funcionamiento de la fuente de luz con el fin de satisfacer los objetivos marcados. El circuito empleado ha de ser capaz de regular de una forma directa la iluminación de la bombilla de manera que en el caso de la estabilidad, pueda corregirse el error al que se enfrenta, y en el caso de la regulación pueda seleccionarse el punto de trabajo al que se quiera trabajar.

Antes de hacer frente a la regulación de la bombilla se requiere de una investigación previa del comportamiento de la bombilla bajo diferentes acciones.

4.3.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA BOMBILLA HALÓGENA

Con el fin de estudiar el comportamiento de la bombilla se ha llevado a cabo un experimento con el cual se pretende visualizar las variaciones que ocurren a lo largo del tiempo.

Utilizando un Arduino Uno junto con el programa PLX-DAQ es posible obtener en tiempo real los datos adquiridos por el microcontrolador Arduino en una hoja Excel. Gracias a esto, un sensor de luminiscencia LDR y un sensor de temperatura LM35 se ha podido llevar a cabo el estudio pertinente de variación de luminiscencia a lo largo del tiempo. Aunque los datos de la fotorresistencia LDR pueden verse alterados por la variación de la temperatura, este ensayo se empleará para el estudio del comportamiento de la bombilla una vez alcanzado el régimen permanente de temperatura.

Tras un análisis de la planta generada, se puede observar por una parte, la potencia lumínica que suministra la bombilla cuando es alimentada por parte de una fuente CC es ligeramente mayor que cuando se alimenta con una fuente de alimentación de CA. Esto es debido a que en el caso de la corriente alterna, el valor eficaz de la tensión es de 11,5 V lo que no permite el trabajo en condiciones de máxima potencia. Aunque trabajar a una potencia menor puede ayudar a alargar la vida útil de la bombilla, puede suponer una gran pérdida de potencia acoplada además de una complicación mayor a la hora de gestionar el control con tiristores. Dadas estas características se abandona la opción de alimentación en alterna para tratar la alimentación en corriente continua.

Por otro lado, se observa una reducción en potencia a lo largo del tiempo la cual pone en compromiso los experimentos realizados con una bombilla de estas características. Esta característica es observable en el caso de los dos tipos de alimentaciones por lo que será un comportamiento a tener en cuenta en el control. Cabe destacar también el ensayo mediante el medidor de potencia acoplada Ophir Smart Head to USB interface que resalta una pérdida sustancial de potencia a lo largo del régimen transitorio inicial de encendido de la fuente de luz. Aunque frente a la pérdida de potencia debido al régimen transitorio de temperatura no es posible aplicar una corrección capaz de garantizar la misma potencia que en el instante de encendido, sí que es posible aplicar pequeños aumentos de corriente a lo largo del régimen permanente con el fin de tratar de corregir las pérdidas que puedan causarse a lo largo del tiempo.



ILUSTRACIÓN 37: GRÁFICO CON PÉRDIDAS A LO LARGO DE UNA HORA Y MEDIA

4.3.2. ANÁLISIS DE SOLUCIONES DE REGULACIÓN

Una vez se ha detectado el problema de inestabilidad temporal se ha de desarrollar una solución que sea capaz de solventarlo. Esta solución deberá aumentar la alimentación de la bombilla en función de las pérdidas de potencia lumínica que se puedan percibir a lo largo del tiempo. Para solucionarlo, con la ayuda de un regulador de tensión se hará trabajar a la bombilla en una situación ligeramente inferior al 100% de su potencia (por ejemplo al 97%). Una vez establecida esta regulación se será capaz de actuar sobre pérdidas de potencia con un ligero aumento de la potencia suministrada con un margen más que suficiente para cubrir variaciones en un intervalo prolongado de tiempo. Con el fin de llevar a cabo una adecuada gestión de la alimentación se plantean diferentes opciones que se encargarán del suministro de energía a la bombilla. Esta función de aumento de potencia en función de las pérdidas será esencial para la corrección del error diferencia entre referencia y datos del sensor en el lazo de control.

Para la regulación de tensión se proponen dos tipos distintos de reguladores que se muestran a continuación.

4.3.2.1. REGULACIÓN EN BASE A FUENTES REGULABLES DE ALIMENTACIÓN (SWITCHING REGULATOR)

Un regulador ajustable conmutado es básicamente un circuito encargado de proporcionar una salida regulada en su terminal de salida la cual puede ser ajustada manipulando la intensidad de salida de otro de sus terminales. Con el ajuste de una resistencia se puede controlar la salida en tensión la cual se suministrará a la carga. El principal problema reside en la comunicación con el microcontrolador. Éste no está capacitado para soportar intensidades elevadas ya que una demanda de corriente puede suponer la pérdida de las funcionalidades del microcontrolador.



ILUSTRACIÓN 38: FUENTE DE ALIMENTACIÓN REGULADA (SWITCH REGULATOR)

Para conseguir una regulación que abarque un rango elevado de tensiones se puede recurrir al empleo de un potenciómetro digital. La comunicación de este tipo de circuitos integrados se lleva a cabo mediante comunicación I2C.

Dado el elevado precio del propio regulador como del potenciómetro digital esta opción quedo descartada.

4.3.2.2. REGULACIÓN ESTILO BUCK

La otra opción de alimentación que se tiene es la alimentación basada en convertidores buck. Este tipo de convertidores son capaces de regular la tensión de su salida en función del control aplicado sobre un transistor que actúa como interruptor. En función del ciclo de trabajo presente en el transistor y gracias a la configuración de filtro, es posible reducir la tensión de la salida desde la tensión de alimentación hasta cero. Esta es la configuración más adecuada que permitirá mediante regulación PWM controlar el ciclo de trabajo sobre un terminal del microcontrolador, el cual establecerá el interruptor como abierto o como cerrado.

Para llevar a cabo esta configuración se plantean diferentes opciones que pueden actuar de la misma manera.

Por un lado tenemos el circuito mediante elementos discretos los cuales serán por un lado un transistor MOSFET y el driver de transistores encargado de elevar la tensión.

Otra opción es la de un interruptor de potencia de alto, interruptor que está especialmente diseñado para la situación propuesta. Internamente implementa el transistor para conducir y cortar la corriente en la rama de alta tensión que compone el regulador.

Finalmente se pueden emplear circuitos integrados que disponen de puentes en H o medios puentes para actuar como el transistor en alto. Aunque este no es el fin principal de estos dispositivos sí que integran la posibilidad de realizar esta acción de una manera altamente eficiente.

4.3.3. SOLUCIÓN DE REGULACIÓN ADOPTADA

Aunque se ha trabajado con todas las opciones salvo con la fuente regulable de alimentación, finalmente se ha elegido la opción del interruptor de potencia de alto integrado en un circuito del tipo de regulador de tensión buck.

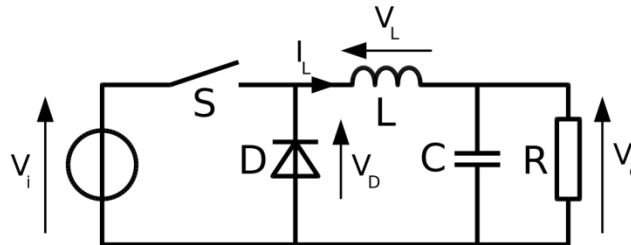


ILUSTRACIÓN 39: CONTROLADOR BUCK (WIKIPEDIA)

El circuito integrado empleado para este fin ha sido BTS5016SDA de Infineon Technologies. Este circuito integrado dispone de regulación interna de temperatura además de una limitación de corriente que protegerá en situaciones adversas para el dispositivo, siendo capaz incluso de avisar de lo que ha ocurrido en el sistema. Este integrado dispone del esquema mostrado a continuación.

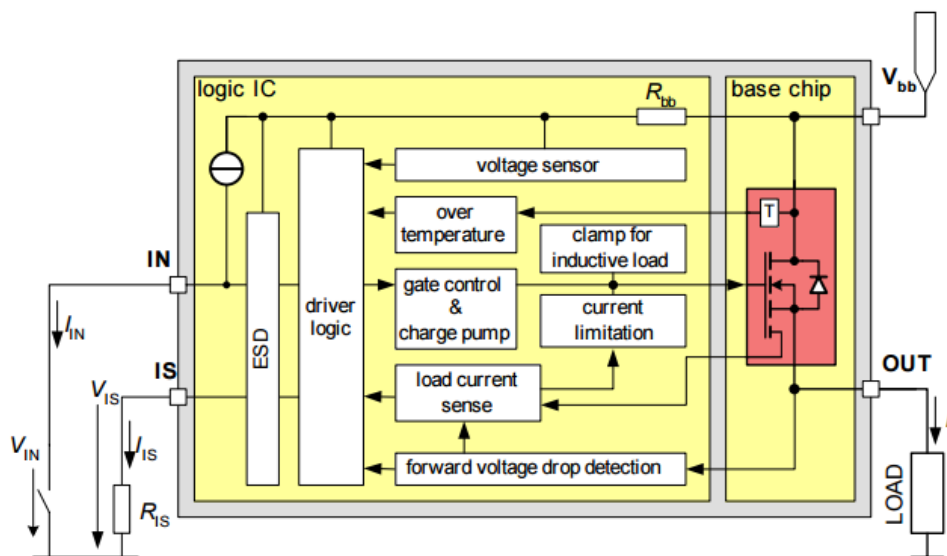


ILUSTRACIÓN 40: ESQUEMA DEL REGULADOR BTS5016SDA

Esta opción además de haber sido diseñada para este fin, integra todo lo necesario además de controles extra de prevención. Su corriente nominal es de 5A, cercano al punto de operación en el que se encuentra nuestra bombilla (4,2 A).

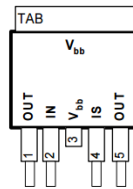


ILUSTRACIÓN 41: PINES DEL DISPOSITIVO

Este circuito dispone únicamente de cuatro terminales para su uso.

- Alimentación: Alimentación del circuito de potencia
- Salida (out): Salida en función de la patilla de control.
- Trigger: Control de interruptor encendido o apagado. Es un control en corriente por lo que se utilizará un transistor el cual permita o no una circulación de corriente.
- Sens (no se empleará): Patilla que en función de su corriente de salida informa del problema que puede estar sucediendo.

Además de este dispositivos e han de integrar los diferentes elementos de los que dispone un controlador de tensión buck. Estos elementos son el diodo de libre circulación y el filtro compuesto por el condensador y la bobina en la salida.

4.3.4. PROBLEMA EN LA ALIMENTACIÓN DEBIDO AL REGULADOR DE TENSIÓN.

El problema de la alimentación DC externa sale cuando se alimenta mediante una de estas el regulador de tensión insertado en el dispositivo. Debido a su realimentación en corriente, la demanda pulsada de corriente inestabiliza el control de la fuente siendo así incapaz de alimentar el circuito. Para solventar este error se ha de insertar una batería de condensadores a la salida de la fuente, de manera que sean capaces de suministrar ellos la corriente y reducir la demanda de la fuente.

Aun así esto provoca una pérdida de control en la corriente que circula en el interruptor, pudiendo sobrepasar la corriente previamente establecida. Aunque existen controladores para altas corrientes, el controlador elegido no está capacitado, activa su control interno de corriente y la bloquea con el fin de evitar ser dañado.

Para evitar esta situación se ha quitado el condensador de salida del controlador de tensión que hará que se alimente la bombilla mediante una señal pulsada. Esta alimentación pulsada no compromete la estabilidad del dispositivo aunque puede reducir la vida útil de la bombilla.

Dados los cambios requeridos se dispondrá finalmente de este circuito de alimentación de la bombilla.

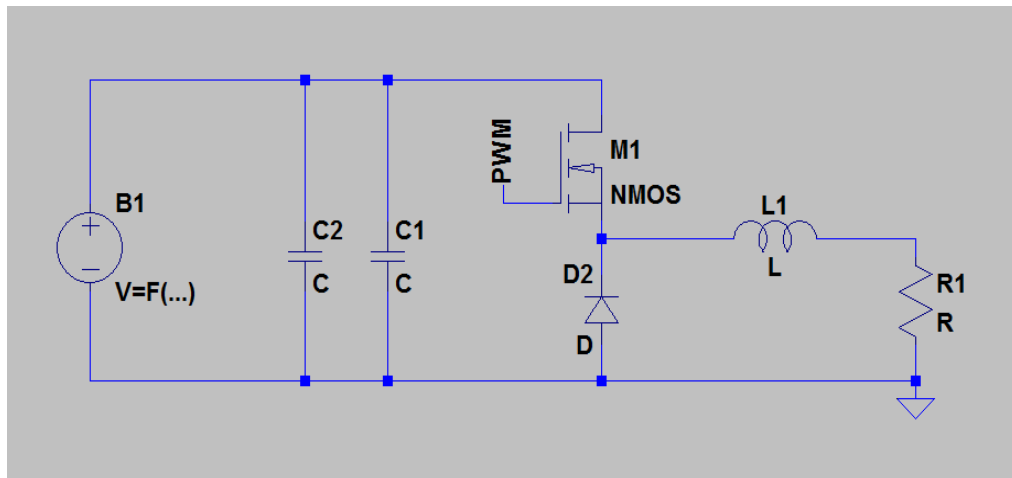


ILUSTRACIÓN 42: ESQUEMA DEL CIRCUITO FINAL EN LT SPICE

4.4. MICROCONTROLADOR

El cerebro del dispositivo reside en este chip. Este será el encargado de manipular el dispositivo en función de su estado, sus datos adquiridos y la interacción con el operario. Dada la relevancia de este circuito integrado en la fuente de luz se llevará a cabo el análisis de este en este apartado.

4.4.1. SELECCIÓN DE MICROCONTROLADOR

Tras el trabajo con Arduino y Microchip se han desarrollado conocimientos suficientes para el trabajo con diferentes series de microcontroladores presentes en el mercado. Desde la aparición de Arduino, muchas empresas han invertido en el desarrollo de placas de aprendizaje sencillas, creación de comunidades de programadores y apostando por el hardware libre. Todo ello brinda la oportunidad de trabajar con líneas diferentes de microcontroladores.

Freescale, parte de la antigua división de Motorola, es uno de los fabricantes de semiconductores que más apuesta por un sencillo uso de sus dispositivos. Cabe destacar su apuesta por la arquitectura ARM (la cual por ejemplo PIC no incorpora). Los procesadores y microcontroladores que implementan esta arquitectura basada en instrucciones de 32 y 64 bits son relativamente simples y esto los hace ideales para trabajos de baja potencia. Esto los ha convertido en predominantes de la electrónica móvil e integrada.

La disposición de placas de desarrollo de Freescale permite trabajar en diversas familias de esta arquitectura cada vez más estandarizada. Las placas, de un precio más que competitivo,

son el primer paso para el trabajo en con nuevos dispositivos, ya que gracias a demos de aplicaciones suponen un primer contacto con esta arquitectura.

La familia de procesadores Cortex-M del estándar ARM es ideal para aplicaciones embebidas donde el coste y la potencias son factores a tener en cuenta, son la mejor alternativa. A esto se le suma la sencilla migración que se puede hacer de un procesador Cortex-M a otro lo cual los convierte en la opción ideal para este proyecto.

Esta familia se divide en función del núcleo del microcontrolador, donde se pueden encontrar los M0, M0+, M3, M4 y M7 en función de su potencia.

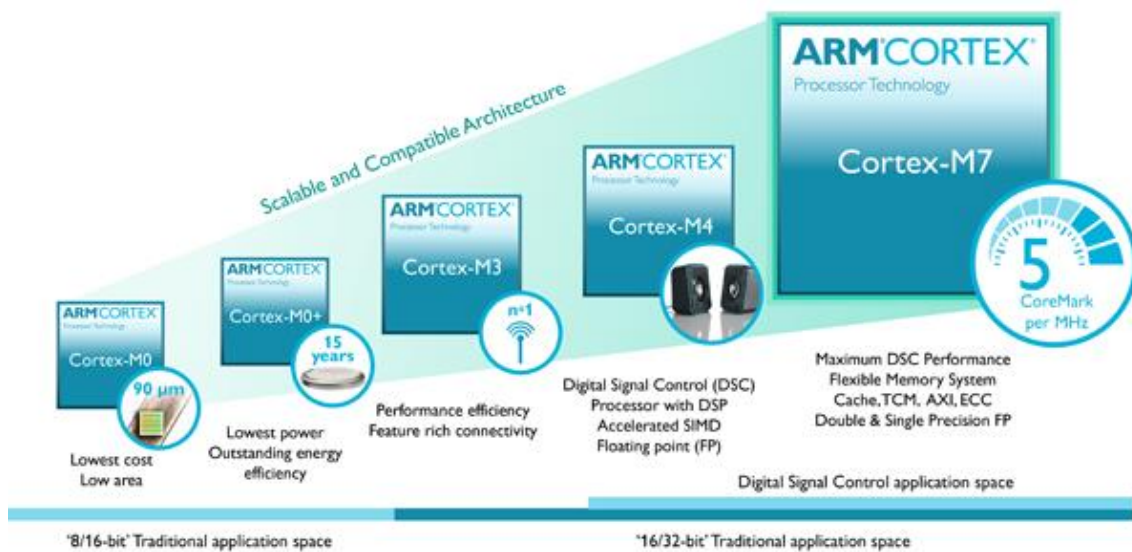


ILUSTRACIÓN 43: ARM CORTEX-M FAMILY

El microcontrolador que se empleará será un Cortex-M4 el cual posee una potencia suficiente para el procesamiento de datos y un coste reducido. Aunque un Cortex-M0 es suficientemente capaz de soportar la aplicación propuesta, el trabajo con microcontroladores de la gama más común facilita la adquisición de información para llevar a cabo una programación eficiente en un entorno en el que no se ha trabajado previamente.

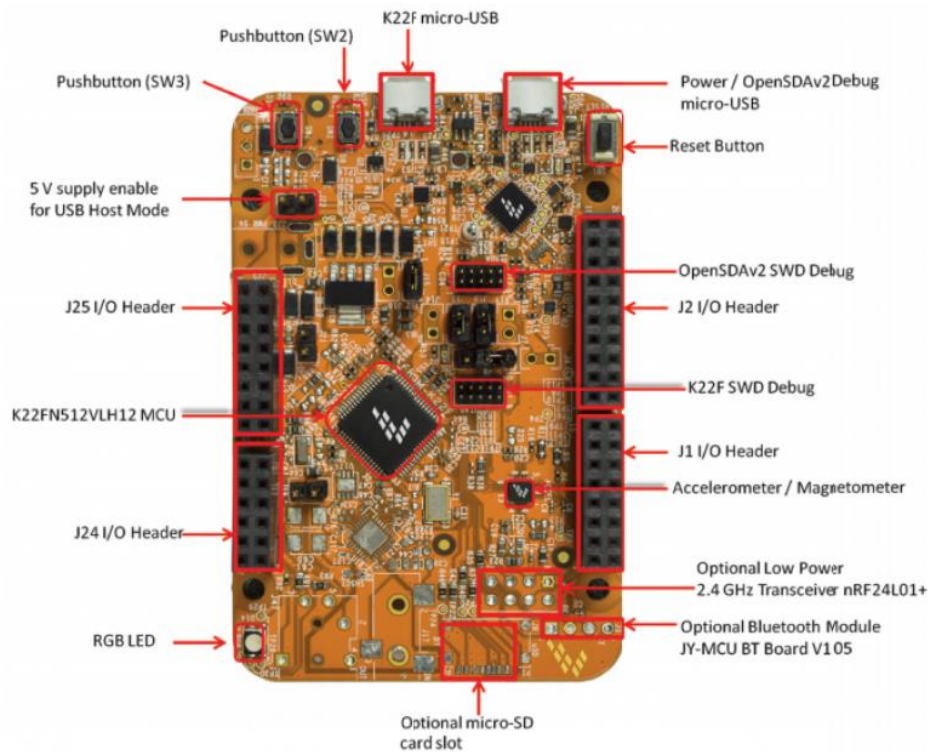


ILUSTRACIÓN 44: PLACA DE DESARROLLO FRDM-K22F

La placa de desarrollo FRDM-K22F, la cual incluye un procesador Cortex-M4 (MK22FN512VLH12) ha sido la placa seleccionada para el trabajo y control de la fuente de luz blanca a desarrollar. La mejor característica de esta placa de desarrollo es la implementación de un debugger propio con el cual se podrá depurar el código. Aunque se trabajará el control mediante la placa de desarrollo, finalmente se llevará a cabo la inserción del microcontrolador en la tarjeta electrónica interior.

4.4.2. FUNCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

El microcontrolador es el encargado de que el dispositivo se encuentre trabajando en las condiciones adecuadas de operación. En este apartado se explicarán las funciones principales que este lleva a cabo con el fin de que se garantice la máxima estabilidad posible en la salida del controlador.

La principal función del microcontrolador es la regulación de la alimentación de la bombilla halógena la cual, en función del estado de la bombilla, ha de incrementarse o reducirse. Esta es su función principal, la lectura de la variable suministrada por el fotodiodo BPW21R establecido como sensor de luminosidad y en función de las variaciones presentes en este sensor se establecerá la corrección necesaria para volver a la situación anterior. Además de ello se permite establecer una reducción de potencia mediante un potenciómetro instalado en la

superficie de la caja el cual permite realizar una reducción de potencia con su correspondiente estabilidad.

El empleo de los dos convertidores analógicos digitales es clave para el control del cual se encargará el microcontrolador. Mediante el primero de ellos se recogerá la señal proveniente del fotodiodo que previamente habrá sido adaptada para la correcta regulación. Mediante el segundo convertidor analógico digital se llevará a cabo el establecimiento del punto de operación. La conexión es directa al potenciómetro y la regulación de este en todo el rango de admisión supondrá una reducción parcial (la reducción será lineal en el rango superior del 50%, nunca se reducirá la potencia más del 50% debido a problemas de temperatura que puede suponer en el transistor en alto de regulación de la bombilla) en el dispositivo. En ambos casos, se tendrá que controlar el ruido que estos convertidores tienen. En el caso del sensor, se empleará un vector que actuará como filtro eliminando así el ruido blanco que dispondrá esta salida. En el caso de la regulación de punto de trabajo del segundo convertidor, se llevará a cabo una rutina de bloqueo de la variable en el caso de variaciones pequeñas y un tiempo de adquisición corto en el caso de detección de un cambio brusco.

Por otro lado, mediante la modulación de PWM de la que dispone el microcontrolador se llevará a cabo el encendido y apagado de la alimentación de la bombilla. Al tratarse de una carga que emite en función de la temperatura a la que se encuentra (filamento), la cual dispone de una dinámica lenta, no presentara variaciones rápidas al ser encendida y apagada. Es por ello que la conmutación encendido apagado es la mejor opción en una carga de tan alto consumo de potencia. Un control de intensidad lineal supondrá un consumo muy elevado de potencia que requerirá de una disipación demasiado grande. Esta modulación PWM se llevará a cabo con el módulo FTM (Flex Timer Module) el cual va directamente relacionado con el PWM. Estableciendo una frecuencia de operación de 500 Hz, lo suficientemente grande para evitar interferencias en los tiempos de subida y de bajada marcados por el regulador de potencia.

También se requiere de una rutina especial de encendido ya que un encendido bruto supone alcanzar la inestabilidad por parte de la alimentación incapacitando el funcionamiento normal de la fuente de alimentación. Con un aumento controlado del ciclo de trabajo se puede conseguir esta inicialización del dispositivo.

El algoritmo de control se insertará en una rutina llamada en forma de interrupción cada milisegundo de manera que su actuación (o no actuación) sea controlada en el tiempo. Para ello se utilizarán los módulos PIT (Periodic Interrupt Timer) diseñados para interrumpir el programa principal y saltar a una rutina de interrupción cada tiempo establecido. El comportamiento del

sistema no requerirá de una ganancia elevada debido a la dinámica de la propia bombilla y se podrá corregir con pequeñas variaciones llevadas a cabo únicamente mediante un control proporcional.

Para el adecuado funcionamiento de los módulos se han de llevar a cabo sus configuraciones pertinentes que han sido estudiadas y se encuentran en funciones de configuración establecidas a lo largo del código.

4.4.3. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN

La programación del microcontrolador ha de ser llevada mediante el softwares capaces de programar el mencionado microcontrolador entre los que se encuentra Kinetis Desing Studio. Este software libre que Freescale pone a nuestra disposición es capaz de programar todos los microcontroladores de la mencionada casa, facilita demostraciones de los principales módulos periféricos y dispone de una gran cantidad de librerías diseñadas por el propio fabricante con el fin de trabajar a un nivel más alto de programación y evitar la escritura y lectura directa de los registros.

La programación se lleva a cabo mediante el lenguaje de programación C, el cual posteriormente es traducido a ensamblador y finalmente a lenguaje máquina.

Gracias a este entorno de programación intuitivo no solo se es capaz de visualizar el código, sino que se pueden llevar a cabo configuraciones de los distintos módulos independientes del propio código. Para ello se ha empleado Processor Expert, un apartado del propio software encargado de informar, seleccionar y facilitar el trabajo con los módulos periféricos empleados. Además de ello, Processor Expert dispone de las funciones de todos los módulos y las librerías necesarias para cada microcontrolador. Se crea así un entorno de programación que incluye el trabajo al nivel más bajo de C además de la posibilidad de realización de un código en C a más alto nivel y mucho más intuitivo que es como se ha llevado a cabo en esta ocasión.

4.4.4. DEBUGGING Y PROGRAMACIÓN

La disposición de una placa que incluye un debugger facilita la comprobación del código de manera funcional, pudiendo leer el estado de cada variable, puerto o adquisición en cada ciclo del programa. Es claramente ventajoso disponer de esta funcionalidad a la hora de programar y el hecho de que esté incluido en la placa supone un ahorro de 200€ en costos del debugger.

Mediante un análisis de la placa se puede observar que es posible el empleo del debugger de una placa para programar otras ya que es mediante el puerto JTAG mini donde se lleva a cabo la programación y el debugging. La propia placa de desarrollo da la oportunidad de la programación de microcontroladores externos de esta manera. Gracias a un cable JTAG mini y la manipulación de un conector de la placa es posible realizar una programación rápida de microcontroladores externos.

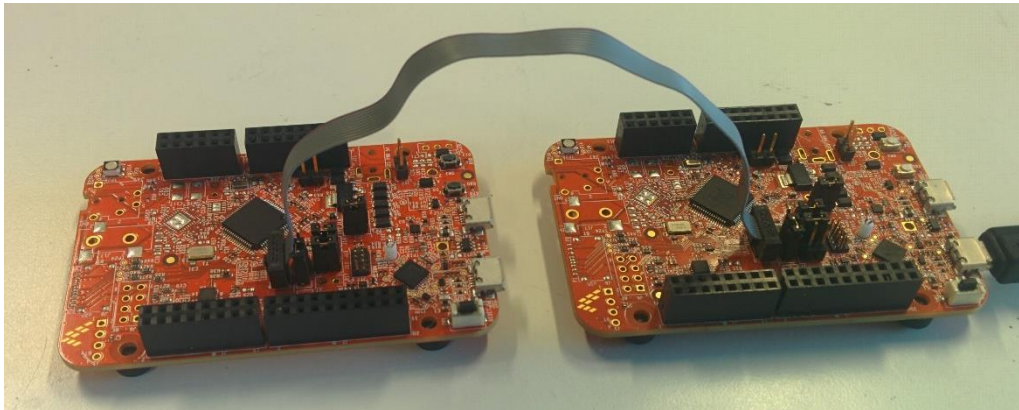


ILUSTRACIÓN 45: PUENTE JTAG SWD MINI

4.5. CIRCUITO PARA LAS SEÑALES ANALÓGICAS Y EL CONTROLADOR DIGITAL

La incursión del microcontrolador en la placa va acompañada del circuito necesario para el correcto funcionamiento del microcontrolador y los pines empleados con sus respectivas funciones. Tanto las entradas analógicas como las salidas digitales requieren de circuitos de adaptación de señales y también se requerirá del circuito pertinente de programación.

Como se ha mencionado anteriormente, las principales funciones se llevan a cabo mediante el empleo de los convertidores analógicos digitales y la modulación PWM. Se requerirá de circuitos de adaptación necesarios para que estos elementos de manera que la señal de salida del microcontrolador y las señales de entrada, estén acondicionadas a la resolución a la que el micro trabaja. A todo esto se le suma el propio circuito de alimentación del microcontrolador, el cual, al ser de bajo consumo, trabaja a 3,3 V.

Con el fin de llevar a cabo la alimentación de la electrónica digital, se dispondrá de un regulador de tensión lineal LM1117-33 el cual se encarga de establecer una salida continua a 3,3 V cuando este circuito integrado es alimentado por un voltaje superior que se encuentre dentro de un rango que establece su fabricante. La mayor ventaja del regulador lineal es la constancia de su salida la cual no sufre variaciones elevadas cuando la alimentación de entrada sí que las

sufre. Esto es ideal ya que el propio circuito conmutado de la bombilla genera variaciones relativamente grandes en la alimentación general de 12V.

Como se ha explicado anteriormente, el circuito integrado del interruptor conmutado dispone de activación en corriente. El microcontrolador solo dispone de salida en tensión y esta no puede ser lo suficientemente elevadas como para evitar la circulación de la corriente. Con el fin de proteger esta salida del microcontrolador frente a sobretensiones o sobrecorrientes y asegurar el correcto funcionamiento de la regulación PWM, mediante la puerta de un transistor MOSFET se regulará el paso o el corte de la corriente de salida del control del interruptor de potencia. No se requiere de un transistor de altas características y se podrá llevar a cabo con la inserción de un transistor de canal N ZVN4424A. Se requerirá de una resistencia de pull-down en la patilla de salida del PWM para que a la hora de iniciar el dispositivo no se causen inestabilidades debidas a la regulación de arranque.

Debido al comportamiento del fotodiodo (suministra una corriente en función de la luz que incida sobre él) se ha de diseñar un circuito que sea capaz de convertir esa corriente en una tensión limitada entre los 0 y 3,3V (tensión del conversor analógico digital). Para lograr establecer la tensión en este rango en función de la corriente que circule por él, se ha de amplificar la tensión que se genera al circular esa corriente por una resistencia. Estableciendo una ganancia adecuada de amplificación se puede maximizar la resolución del fotodiodo.

Cabe destacar que al tratarse de un amplificador operacional de una única alimentación se ha de establecer un circuito de amplificación no inversor como el que se muestra en la figura.

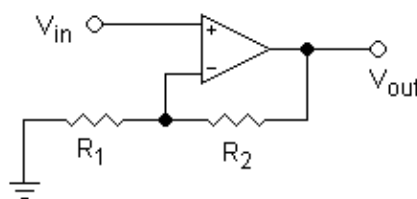


ILUSTRACIÓN 46: AMPLIFICADOR OPERACIONAL EN CONFIGURACIÓN NO INVERSORA

La ganancia de este circuito viene definida por la siguiente fórmula:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

La resistencia en paralelo al fotodiodo será de 1KΩ de manera que se genere una diferencia de potencial aceptable. La resistencia del circuito de amplificación R1 será también de 1KΩ mientras que R2 será un potenciómetro multivuelta. La razón del potenciómetro

multivuelta reside en la calibración de la señal analógica de llegada, esta tendrá que ser modificada en el caso de las pruebas con el controlador no implementado en la PCB y en el caso del controlador implementado para conseguir la resolución que se desea.

El regulador de potencia establecido mediante el potenciómetro no requiere de ajuste de la señal para ser insertada al puerto ya que el potenciómetro se alimentará directamente desde la salida del regulador.

Para el correcto funcionamiento de los conversores analógicos digitales se ha de alimentar los puertos de alimentación de las señales analógicas, los cuales capacitan al microcontrolador para el empleo de estos conversores.

Tan importante como la manipulación de las señales es la programación del dispositivo. Los terminales de programación han de ser llevados a un puerto JTAG mini o SWD, el cual permitirá que el microcontrolador sea programado directamente sobre la placa de una manera sencilla. En el esquemático de la placa de desarrollo se pueden ver los terminales de programación.

SWD CONNECTOR

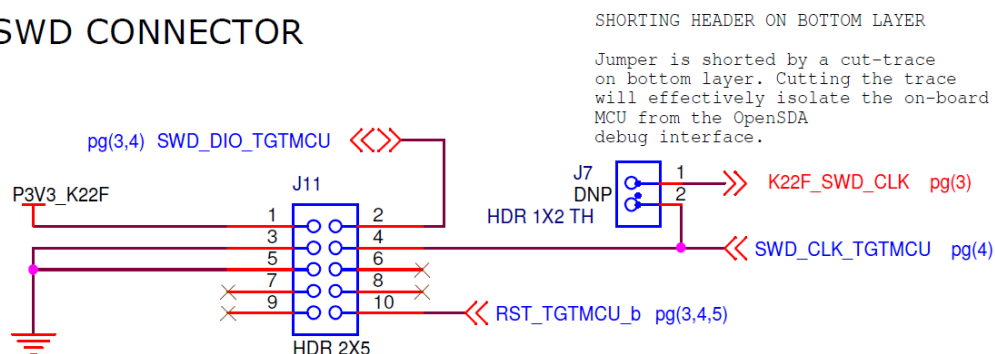


ILUSTRACIÓN 47. SWD CONECTOR

4.6. PCB Y ESTUDIO DE LA ELECTRÓNICA

4.6.1. PCB

Dado el fin del proyecto de diseño de un dispositivo funcional, se requerirá de su diseño de tarjeta de PCB (Printed Circuit Board)) en la cual se integran todos los componentes electrónicos. Estas placas están compuestas de una base no conductora, generalmente de fibra de vidrio, sobre la cual un material conductor define las pistas o caminos para la circulación (suele ser normalmente de cobre).

Tras el diseño del circuito inicial en las placas de pruebas este se trasladó a placas protoboard, de manera que se tuviera un circuito electrónico con relativa robustez. Aquí se

muestran una serie de placas empleadas a lo largo del desarrollo del proyecto donde se han ido montando y probando diversos circuitos. En este caso es posible realizar placas interconectables, pero una vez se vaya a realizar el diseño posterior mediante software se han de tener en cuenta todas las consideraciones posibles ya que no es conveniente requerir de posterior manipulación de la placa.

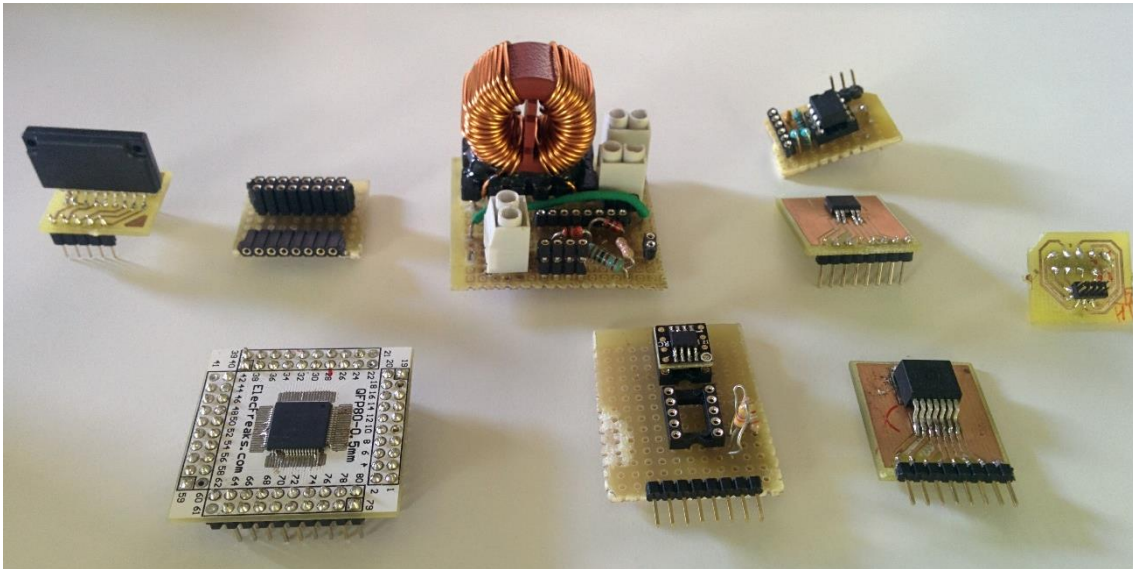


ILUSTRACIÓN 48: DIVERSOS CIRCUITOS EN PROTOBOARD Y ADAPTADORES PCB

Se ha procedido, posteriormente al diseño del esquemático del circuito final sobre el cual se han colocado todos los elementos del circuito. Este esquemático integra todas las conexiones del circuito y será el asistente del software de diseño el que nos ayude a realizar las pistas adecuadamente en función de las conexiones que hemos establecido. Los elementos empleados que no estén en la base de datos del software tienen que ser añadidos de manera manual.

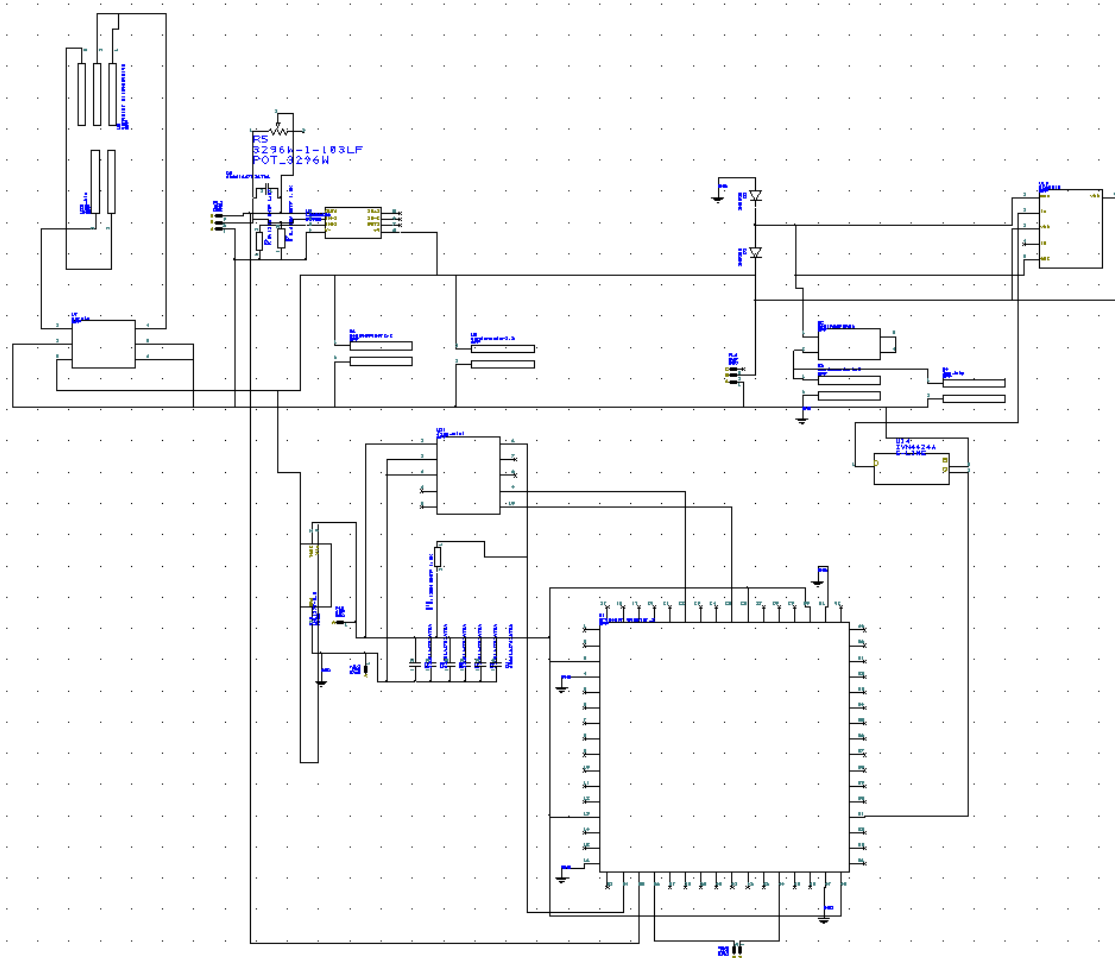


ILUSTRACIÓN 49: ESQUEMÁTICO DESIGN SPARK

A la hora de llevar a cabo el traslado a PCB, donde manualmente se irá optimizando su diseño para cumplir con el tamaño, evitar errores y garantizar su adecuado funcionamiento. Se han de cumplir diversas condiciones para que el PCB funcione de la mejor manera posible.

- Longitud reducida de las pistas. La excesiva largura de las pistas puede suponer una peor transmisión de la señal.
- Disposición de los elementos y las pistas. Los elementos del PCB así como sus pistas deben de estar adecuadamente distribuidas en el PCB y prever las conexiones externas. Por ejemplo el conector JTAG/SWD tiene que estar accesible para poder llevar a cabo la programación, el interruptor debe estar situado en dirección accesible.
- Minimización del espacio utilizado. En este caso concreto de PCB se dispone de un espacio delimitado de 120x40mm. En primera instancia el PCB puede tener estas dimensiones pero es recomendable tratar de minimizarlo y eliminar espacios vacíos.

- Otros: se deben eliminar también los planos de masa no conectados entre sí, intentar separar las diferentes funciones de la placa (digital, analógica y potencia).

A continuación se muestra el diseño llevado a cabo a dos caras donde se incluyen todos los componentes necesarios del PCB, con su distribución final. El PCB cumple su funcionalidad y aunque se ha requerido de distintos diseños en función a los elementos empleados a lo largo del desarrollo del proyecto, es este, el diseño final el que integra todo lo necesario para funcionar de manera autónoma (sin otras placas o puentes). El diseño integra toda la electrónica salvo el fotodiodo y la alimentación los cuales se encuentran uno al lado de la bombilla y la otra en el exterior.

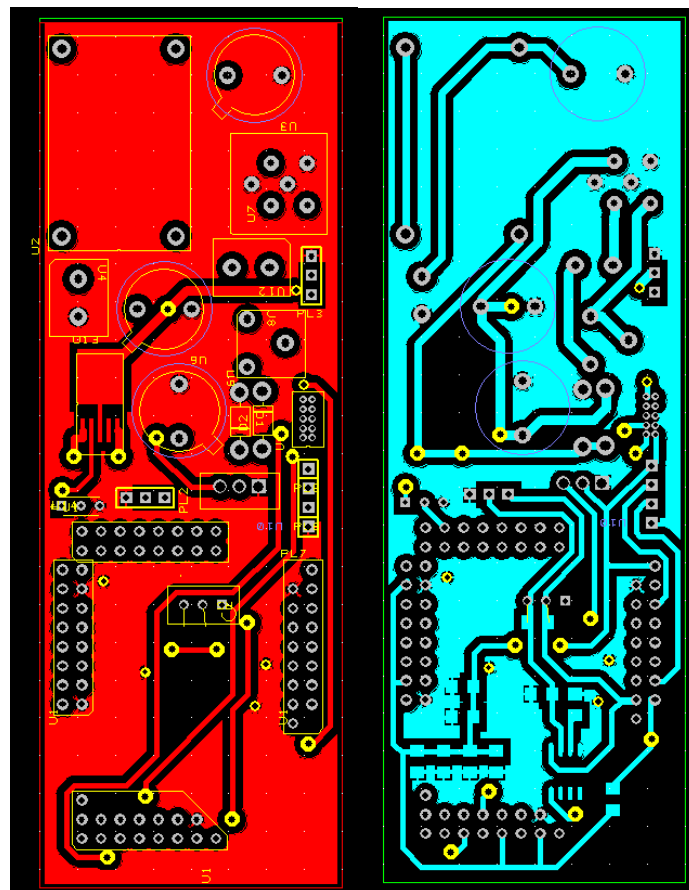


ILUSTRACIÓN 50: CAPA SUPERIOR Y CAPA INFERIOR DEL PCB

Los factores que limitan el diseño del PCB son en primera instancia la dimensión admisible para la inserción del mismo en la caja final, y por otro lado los elementos electrónicos del propio dispositivo.

Tal y como se puede apreciar en la imagen, se dispone de una separación de propósitos dentro de la placa. Por un lado se dispone de la parte de potencia, donde se pueden encontrar

todas las pistas de gran tamaño para la circulación de gran amperaje. Por otro lado, una vez pasada la mitad de la placa, se dispone de las señales analógicas y digitales de baja potencia, las encargadas de dirigir las señales de salida y de entrada del microcontrolador.

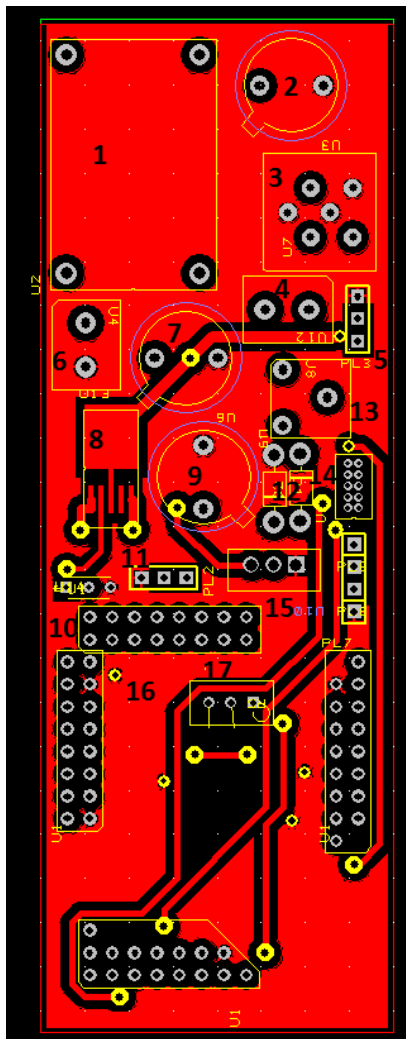
Cabe destacar la inserción del microcontrolador de manera externa. El microcontrolador posee una reducida distancia de pines lo que complica las soldaduras que se tienen que llevar a cabo. A esto se le suma la imposibilidad de fabricación por parte de la Universidad Pública de Navarra de pistas con separación menor a 0.2mm lo que ha llevado a la necesidad de emplear adaptadores para el microcontrolador. A continuación se muestra del montaje empleado.



ILUSTRACIÓN 51: MICROCONTROLADOR EN PLACA COMERCIAL DE 100 PINES

Aunque puede suponer un aumento del tamaño del PCB esta es la única manera que se dispone de emplear este microcontrolador. El montaje resulta mediante zócalos lo cual permite colocar pistas por la cara inferior.

A continuación se enumerarán los elementos que se encuentran en la placa.



1. Bobina
 2. Condensador 4,7mF
 3. Filtro Murata
 4. Conector interruptor
 5. Alimentación ventilación
 6. Conector salida
 7. Condensador 4,7mF
 8. Interruptor inteligente de potencia
 9. Condensador 4,7mF
 10. MOSFET
 11. Conexiones Fotodiodo
 12. Diodos
 13. Conector alimentación
 14. Terminal JTAG
 15. Regulador 3,3 V
 16. Microcontrolador
 17. Potenciómetro de ajuste
- (Parte inferior: Amplificador operacional y componentes superficiales)

4.6.2. ESTUDIO DE LA ELECTRÓNICA

4.6.2.1. FOTODIODO

Uno de los elementos más importantes del circuito no se encuentra en la placa de circuito impreso y es probablemente el elemento que se encarga del correcto funcionamiento del dispositivo. Se trata del fotodiodo, dispositivo que ha de ser estudiado a parte para entender su comportamiento. Este dispositivo integra la potencia lumínica que incide en el dentro de su ventana de sensibilidad y en función de ella genera una corriente proporcional en un rango. Ya se ha explicado cómo se empleará esa corriente pero es el propio fotodiodo el que requiere de un estudio previo.

El fotodiodo seleccionado tiene el pico de sensibilidad en los 500nm lo que lo hace ideal para la fuente de luz halógena emitiendo en lo visible. El problema reside en las variaciones que se pueden generar en él debido a variaciones de temperatura. Aunque en la posición establecida

se dispone de aislamiento térmico, se necesita esperar al régimen estacionario de temperatura para que las medidas del sensor sean consideradas como válidas.

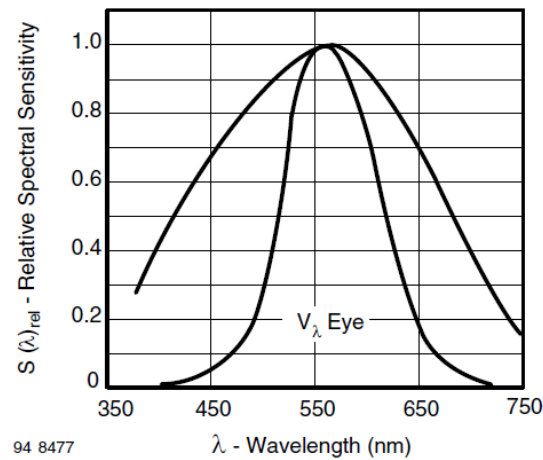


ILUSTRACIÓN 52: SENSIBILIDAD DEL FOTODIODO

4.6.2.2. COMPORTAMIENTO DEL CIRCUITO

Aunque el circuito ha sido diseñado para establecer un voltaje continuo en la salida del dispositivo gracias al filtro paso bajo establecido, este circuito inestabiliza el flujo de corriente lo que provoca que la propia seguridad del interruptor inteligente de alto se active, cortando la alimentación del circuito.

Esta configuración de circuito es la ideal para maximizar la vida útil de la bombilla ya que una alimentación constante en corriente aumenta la vida útil de la misma, pero del mismo modo, aumenta el precio y requerimientos del interruptor de potencia. Tras trabajar con diversos interruptores y drivers de potencia se ha llegado a la conclusión de que es mejor prescindir del filtro de salida, ya que la bombilla al ser comercial, es de fácil acceso y precio reducido.

De la misma manera, se ha estudiado, como se ha dicho anteriormente que la reducción de la potencia de salida por debajo del 50% del ciclo de trabajo sobrecalienta el interruptor en alto lo que provoca que su seguridad en temperatura salte. La refrigeración de este mediante la ventilación no es suficiente por lo que se ha limitado mediante software esta reducción de potencia para asegurar el trabajo adecuado.

Hay diversas maneras de reducir la potencia acoplada a la fibra por lo que la reducción de la potencia, como por ejemplo aflojando el conector de la fibra, lo que no lo convierte en un problema principal.

5. ENSAYOS

Tras la integración de la electrónica, calibración de la óptica y opto-mecánica, mecanizado de la caja, y programación del dispositivo se han de llevar a cabo las pruebas necesarias para verificar el adecuado comportamiento del diseño. Para ello, mediante los instrumentos de medición disponibles en el laboratorio se van a estudiar los distintos comportamientos de la fuente de luz con los cuales se podrá llegar a la conclusión de que el sistema es estable y potente.



ILUSTRACIÓN 53: DISPOSITIVO FINAL (CERRADO)

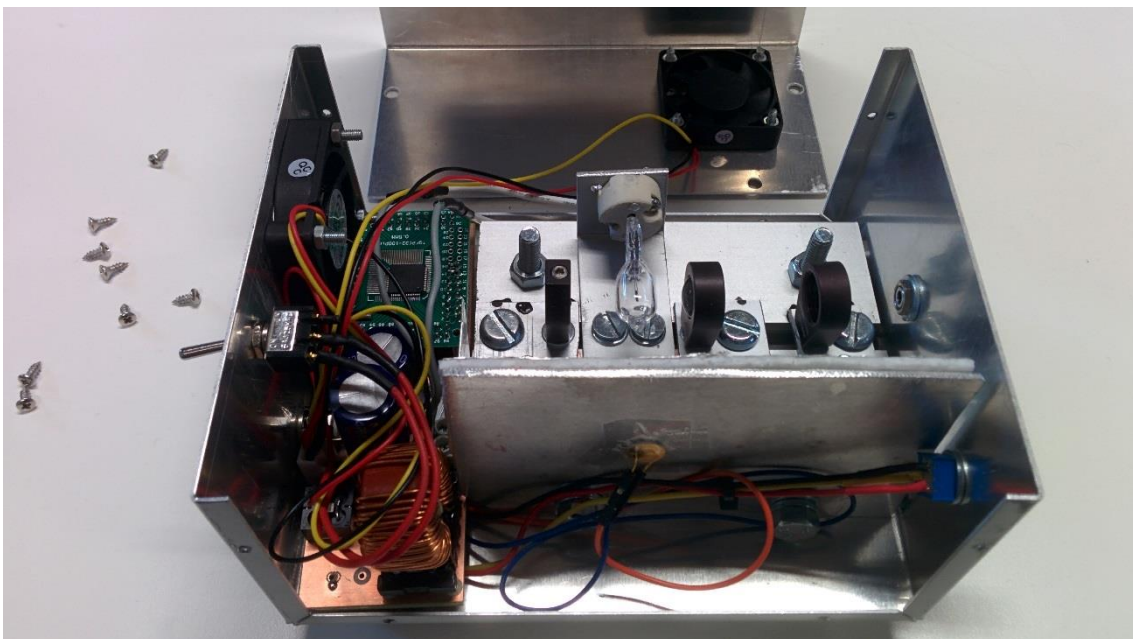


ILUSTRACIÓN 54: DISPOSITIVO FINAL (ABIERTO)

5.1. ENSAYO OPHIR

El medidor de potencia Ophir SW to USB Interface es un dispositivo para la medición de potencia en láseres y LEDs. Este dispositivo posee un fotodiodo encargado de integrar la potencia que recibe. El usuario ha de introducir la longitud de onda a la que se está trabajando para que el propio Ophir lo pondere por un factor que corregirá la potencia perdida debido a la curva de sensibilidad del propio fotodiodo.

Este dispositivo no es capaz de medir la potencia de la fuente de luz cuando esta presenta una emisión en gran parte del espectro visible y parte del infrarrojo ya que no existe ningún tipo de ponderación para hacerlo, pero al asignarle un factor de ponderación constante se puede ver la variación de la potencia integrada a lo largo del tiempo. Gracias a esto, este dispositivo, sin tener una medición absoluta de la potencia, permite la posibilidad de medir de manera relativa la potencia. En el caso de que no exista variación a lo largo del tiempo en las mediciones, la fuente tendrá un comportamiento estable.

A continuación se muestra un gráfico de medición de potencia del dispositivo final a lo largo de 8 horas y 30 min referenciado desde su máximo y su mínimo.

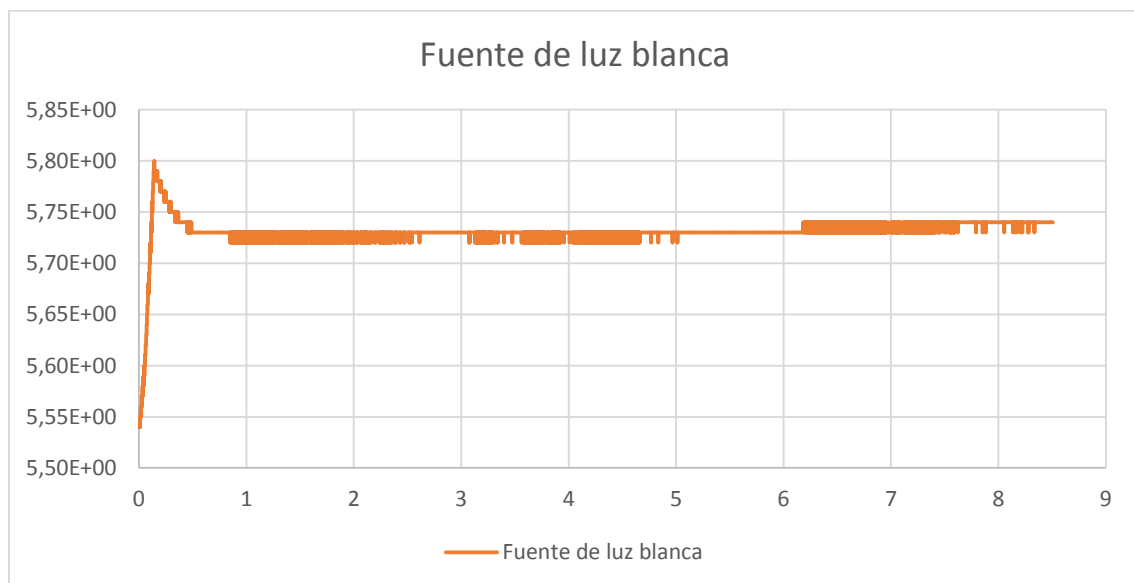


ILUSTRACIÓN 55: VARIACIÓN POTENCIA ESCALA AMPLIADA

A continuación se muestra el gráfico referenciado desde cero donde cero es la bombilla apagada.

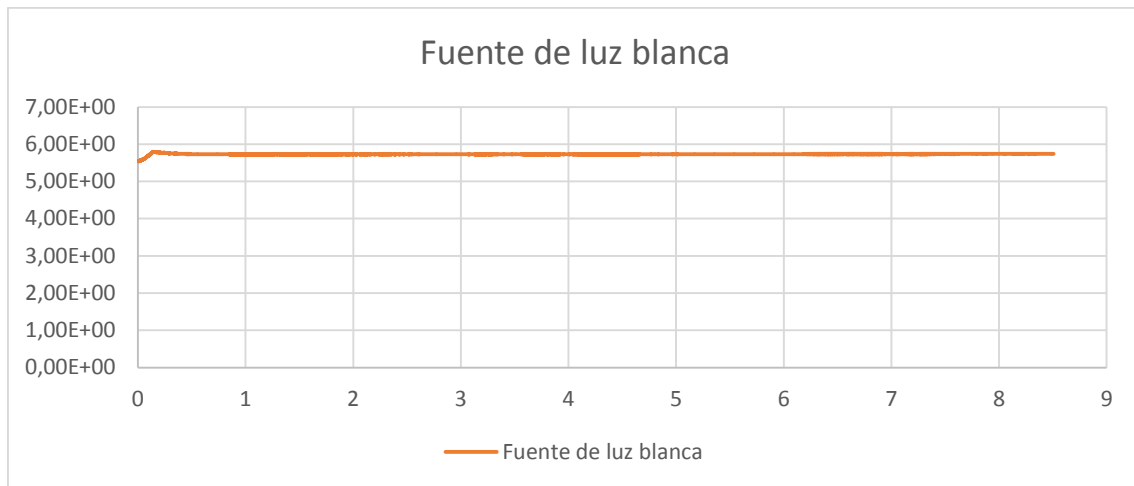


ILUSTRACIÓN 56: VARIACIÓN DE POTENCIA ESCALA REAL

Tal y como se puede apreciar en los gráficos, tras un tiempo de entre 25 y 30 minutos se alcanza el régimen estacionario de temperatura y el falseo de datos en el fotodiodo interno finaliza. Una vez se dispone de la referencia y el fotodiodo empieza a adquirir datos reales (una vez se encuentra en el estacionario las variaciones sí son únicamente de potencia). Cuando se aplica la corrección sobre estos datos se alcanza la estabilidad del dispositivo y el propio sistema es inmune a las variaciones propias de la bombilla.

Aunque el sistema sea inmune a variaciones internas causadas por la propia física de la bombilla, la temperatura exterior genera las variaciones que son apreciables en el primero de los gráficos. Ha de tenerse en cuenta que el fotodiodo sigue siendo sensible a la temperatura, y variaciones de la temperatura ambiente pueden suponer variaciones en el fotodiodo debido al flujo de ventilación. Es por ello que la variación de grados del ambiente puede suponer que la potencia caiga en órdenes del 0,17 al 0,35% en función de los cambios de temperatura. Señalar que las condiciones del ensayo se han sido las del laboratorio de Electrónica Básica de la Universidad Pública de Navarra entre las 12:30 y 21:00 con las diferencias de temperatura que se ha generado a lo largo del día y con un tránsito habitual de gente.

5.2. ENSAYO ESPECTRÓMETRO USB2000

El espectrómetro USB2000 es un espectrómetro de propósito general y configurado para empleo en mediciones del visible. Es capaz de obtener el espectro desde 200 a 800nm. Aunque dispone de un tamaño reducido es un espectrómetro muy apropiado para las mediciones en estos campos y ha sido la mejor opción para este análisis.

En el caso de este ensayo, se van a guardar los espectros cada 5 minutos. En principio, la medición del fotodiodo interno garantizará que la integral de la potencia emitida en todas las longitudes de onda sea constante.

Mediante este experimento se quieren estudiar las variaciones en λ así como las variaciones en cada longitud de onda. Como la fuente de luz tiene la potencia suficiente para saturar el espectrómetro se requiera de una reducción de potencia elevada, llevada a cabo con la inserción de latiguillos extra de fibra, los cuales presentan grandes pérdidas cuando son conectados en serie. La inserción de varios látigos de fibra acentúa pérdidas en longitudes de onda concretas lo que lleva a la presencia de un espectro con pérdidas localizadas sumado a la propia ventana de sensibilidad del espectrómetro. El espectro de los gráficos no representa el espectro de la fuente de luz sino este con grandes pérdidas, este ensayo solo se lleva a cabo para ver las variaciones a lo largo del tiempo sin importar la forma del gráfico.

En todo caso, las mediciones de estabilidad en potencia son más precisas en el dispositivo Ophir por lo que este ensayo se tiene que valorar de una forma más visual.

En el gráfico se presentan tres datos del sistema los cuales son en el instante cero, instante 20 min e instante 8h y 30min.



ILUSTRACIÓN 57: VARIACIÓN ESPECTRAL

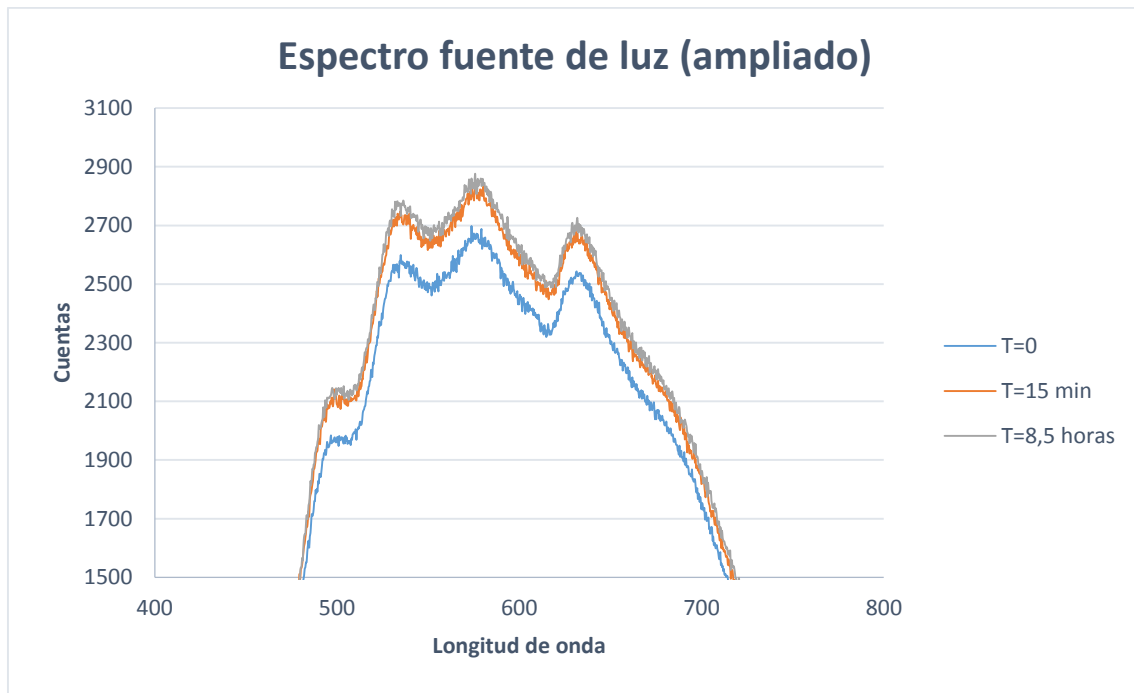


ILUSTRACIÓN 58: VARIACIÓN ESPECTRAL (AMPLIADA)

Tal y como se puede apreciar en el gráfico, la variación el λ es prácticamente nula desde el instante cero lo que cumple con el propósito esperado. La variación de potencia parece que va de la mano de la variación que se ha visto en el módulo medidor de potencia Ophir aunque se insiste que los datos del Ophir son más fiables que los del espectrómetro el cual posee también cierto ruido.

5.3. CONSIDERACIONES DE LOS ENSAYOS

Como se ha comentado anteriormente los ensayos se han llevado a cabo considerando que el modulo medidor de potencia Ophir es el ideal para la obtención de la estabilidad en potencia mientras que el espectrómetro USB2000 es ideal para la obtención de estabilidad en λ .

Aunque los datos son los del dispositivo final, se han ido graficando diversas situaciones a lo largo del proyecto con el fin de disponer de la información necesaria ya fuera para la calibración como para la programación del algoritmo, observar el comportamiento inicial del sistema u observar el comportamiento del deterioro y perdida de estabilidad de una bombilla halógena.

Todo indica a que se ha conseguido corregir el problema de inestabilidad causada por la bombilla halógena y que se es capaz de disponer de un sistema realimentado que trabaja adecuadamente.

Por otro lado, como no se disponía de instrumentación adecuada para la medición de toda la potencia emitida por la bombilla halógena, se ha llevado a cabo el cálculo de la potencia visible acoplada a la fibra mediante el uso del medidor de potencia Ophir, espectrómetros y un LED monocromático.

Aunque se ha observado que no hay variaciones en los ensayos realizados, se debería estudiar el comportamiento detallado de la emisión de cuerpo negro, observando la variación de picos de potencia en función de la temperatura.

5.4. POTENCIA ACOPLADA

Aunque no se ha podido llevar a cabo una medición 100% real de la potencia acoplada a fibra óptica se ha llevado a cabo una extrapolación para el cálculo orientativo de la potencia acoplada a la fibra óptica.

Esta interpolación se ha llevado a cabo mediante la combinación del espectrómetro HR4000 y el medidor de potencia Ophir. Por un lado, gracias a un LED de alta potencia se ha hecho una medida de este. En este caso, el Ophir sí que está capacitado para dar medidas correctas por lo que sí que se puede obtener la potencia acoplada a fibra del LED de alta potencia de emisión en 455 nm (150uW).

Una vez realizada la medición de potencia se puede llevar a cabo la obtención de los espectros mediante el espectrómetro. En teoría el área del espectro del LED será la potencia acoplada a fibra por lo que haciendo una comparación entre áreas se puede obtener la potencia emitida por la fuente de luz en lo visible teniendo en cuenta en todo momento que la potencia considerada será la vista por el espectrómetro.

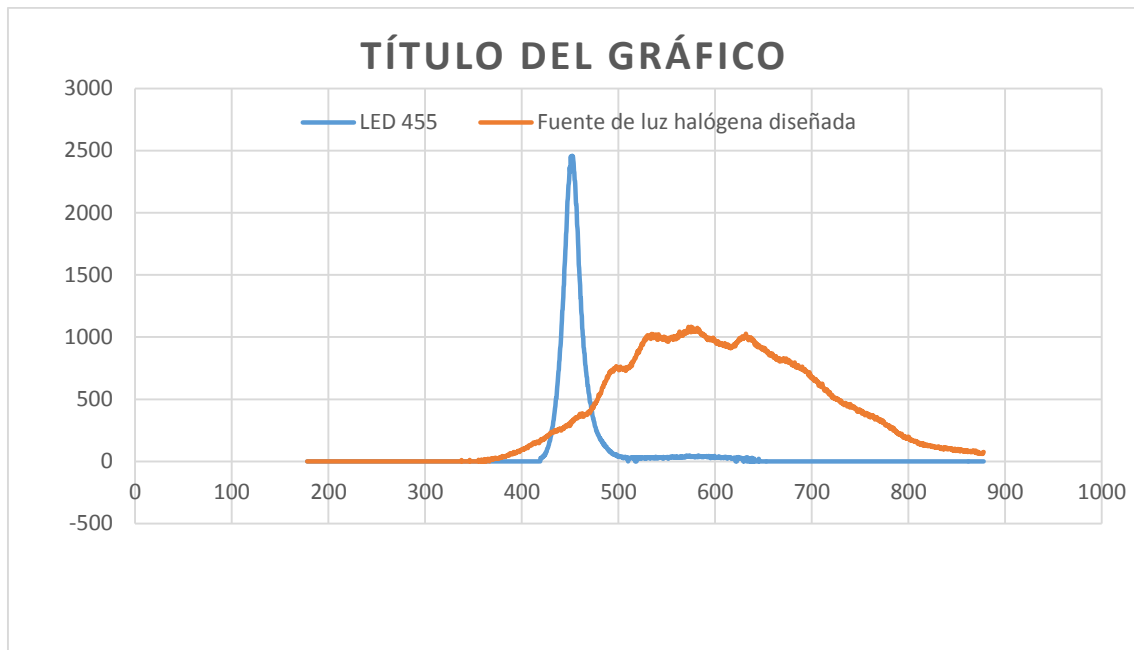


ILUSTRACIÓN 59: ESPECTRO LED REFERENCIA Y HALÓGENA

Mediante ese sistema se ha conseguido un acople de potencia de 650uW en una fibra de 200 micras u apertura numérica de 0,22. Aunque esta medida parece ser baja hay que tener en cuenta que se trata de una aproximación y puede que no sea la medición real final. Por otro lado cabe destacar que las medidas de potencia que dan los fabricantes suelen ser para otro tipo de fibras (diámetro y apertura numérica).

A continuación se lleva a cabo una comparación con la fuente que en características es la más parecida a la fuente diseñada, la cual es la fuente de Thorlabs. Según el fabricante esta fuente, se acopla una potencia de 10mW en una fibra de 400um y de 0,39 de apertura numérica. Trasladando las medidas de 650uW acopladas por la fuente de luz diseñada habiendo hecho la medición en el intervalo de 200 a 900nm, lleva a una potencia acoplada en fibra (como la de las mediciones de Thorlabs) de 8,17mW. Llevando a cabo una medición de la potencia acoplada por Thorlabs en esta región de lo visible donde se ha integrado la potencia de la fuente diseñada, se llega a una potencia acoplada de 3,2 mW (de 200 a 900nm).

Estas mediciones revelan que la potencia acoplada por la fuente de luz diseñada es mayor en el visible que la potencia acoplada por la fuente que es competencia directa. Se puede decir que la fuente diseñada acopla más del doble de potencia lumínica en el visible.

Cabe destacar que no se ha llevado la medición de potencia acoplada en el infrarrojo dado que no se disponían de espectros capaces de medir en el visible y en el infrarrojo.

En las mediciones prácticas, la fuente diseñada es la fuente halógena más potente del laboratorio de sensores doblando la potencia de la ahora segunda fuente más potente (Spectralproducts negra) y cuadruplicando la ahora tercera más potente (Ocean Optics HL-200-FHSA).

A continuación se muestra un gráfico de comparación de la fuente diseñada a máxima potencia y la fuente de Spectralproducts negra.

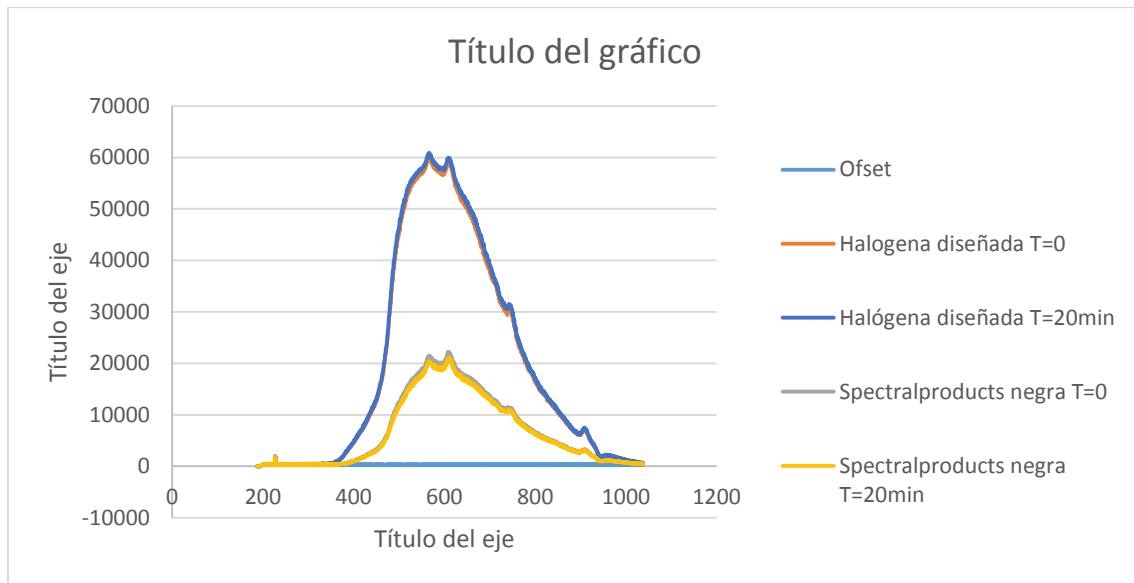


ILUSTRACIÓN 60: COMPARACIÓN FUENTE DISEÑADA Y SPECTRALPRODUCTS NEGRA

6. PRESUPUESTO

A continuación se muestra la tabla de presupuesto de materiales para el desarrollo de la fuente de luz blanca.

Campo	Elemento	Nombre	Uds	Precio	Total	Total sección
Electrónica	Microcontrolador	MK22FN512VLH12	1	6,912	6,912	43,557
	Bobina	Inductor Würth 1000uH	1	5,4	5,4	
	Condensador electrolítico 4,7mF	ECA-1CM472	3	0,923	2,769	
	Murata	BNX016-01	1	4,1	4,1	
	Conector alimentación		1	2,77	2,77	
	Interruptor	Interruptor de palanca SPTD	1	1,18	1,18	
	Interruptor inteligente de alto	BTS5016SDA	1	2,27	2,27	
	Diodo	BYW95C	2	0,5	1	
	MOSFET	ZVN4424A	1	0,708	0,708	
	Regulador Lineal 3,3	LmM1117T-3.3	1	1,35	1,35	
	Potenciometro de precisión	Bourns serie 3296Y	1	1,68	1,68	
	Mplificador operacional	LM358ADG4	1	0,098	0,098	
	Fotodiodo	BPW21R	1	9,95	9,95	
	Potenciometro de panel	Bourns 3310Y001-204L	1	1,51	1,51	
	Adaptador para potenciometro	Mando pot aluminio RS	1	1,36	1,36	
	resistencias superficiales		5	0,02	0,1	
	Condensadores superficiales		10	0,04	0,4	
Adaptador PCB		1	1	1		
Opto-mecánica	Perfil extruido	Perfil 20x60 Tipo-I ran. 5	120cm	1,89	1,89	67,77
	Soporte lente	LMR05 1/2"	2	13,52	27,04	
	Soporte reflector	FMP05 1/2"	1	11,91	11,91	
	Aluminio				10	
	Tornillos				5	
	Tuercas				5	
	Conector fibra	HASMA-SMA Bulkhead adapter	1	6,93	6,93	
Óptica	Lente	LA1540	2	18,63	37,26	73,53
	Reflector	CM127-010-G01	1	32,13	32,13	
	Bombilla	Philips 7027	1	4,14	4,14	
Caja	Caja	75x125x155	1	11	11	11
Alimentación	Fuente conmutada	GSM60A12-P1J	1	27,27	27,27	27,27
					224,127	

TABLA 7: PRESUPUESTO

El precio del dispositivo final asciende a los 224,13€ el cual es menor que el precio de las fuentes de luz comerciales.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE MEJORA

7.1. CONCLUSIONES

Tras la realización del proyecto se han logrado conseguir los objetivos propuestos en un principio. Tras un largo periodo de investigación, otro de diseño y finalmente la fabricación de un prototipo se ha llevado a cabo el proceso de fabricación de un dispositivo final. El proyecto ha sido una manera interesante y entretenida de adentrarse en el campo de sensores de fibra óptica y en el diseño de dispositivos. Se trata del primer diseño integro de un dispositivo realizado y su posterior fabricación lo que ha sido un gran logro para un estudiante de Grado de Tecnologías Industriales.

El trabajo ha servido como una toma de contacto directa con aplicaciones electrónicas integradas. Dentro de esto cabe destacar diversos puntos que han sido de interés a la hora de realizar el proyecto.

- Mediante la selección de componentes se estudia en base a un primer análisis la distribución del propio dispositivo consulta de las características y prueba de los componentes.
- Este apartado va ligado al apartado de diseño ya que ambos se realizan de una manera simultánea. El diseño comprende el análisis y la hoja de ruta a gran escala como la creación de enlaces y conexiones para conformar un dispositivo de manera conjunta. Incluye campos de estudio de alternativas y de planificación de soluciones de todos los campos trabajados (electrónica, óptica y mecánica).
- La fabricación de circuitos funcionales y la realización de un circuito final integrado en el dispositivo suponen un reto importante, ya que muchas de las cosas teóricamente aplicables, pueden conllevar un resultado negativo en la práctica. Los ensayos a los circuitos propuestos, realización de pruebas y la mejora continua aplicada con el fin de cumplir los objetivos de diseño son clave a la hora de desarrollar un dispositivo funcional.
- Aunque ya se ha trabajado con entornos de programación, la programación y estudio de los procesadores Freescale ha sido un reto personal con el cual se ha aprendido dinámicas de programación, estudio de microcontroladores y se ha trabajado con dispositivos diferentes.
- El estudio de un lazo de control sencillo y la aplicación de este con el fin de la obtención de una estabilidad ha supuesto un refuerzo positivo en la percepción del control. El propio manejo, la comprobación de variables en tiempo real que se ha podido llevar

durante el desarrollo del circuito y la programación es de vital importancia para saber cómo se está comportando el dispositivo, como está actuando y valorar como debe de actuar sobre esas lecturas.

- Ha sido necesario aprender a superar los intangibles, factores derivados del proyecto que no forman parte de él, como enfrentarse a problemas, solucionar imprevistos o sobreponerse a resultados inesperadamente negativos.

7.2. LÍNEAS DE FUTURO

A pesar del trabajo realizado sobre el proyecto siempre hay diversas mejoras que no se han podido llevar a cabo por diversos factores. A continuación se muestran las principales mejoras aplicables a la fuente de luz blanca:

- Compensación de la variación del sensor con la temperatura: El régimen transitorio de temperatura es el primer causante de la necesidad del tiempo de espera previo al uso del dispositivo (20-30 min). Con la inserción de un sensor de temperatura y el cálculo de un modelo de comportamiento del sensor en función de la temperatura se puede llevar a cabo una corrección del error en las medidas durante el régimen transitorio, lo que llevaría a un control realimentado que funcionaría desde el instante cero. Con esta mejora incluso se pueden suprimir las variaciones de estabilidad debidas al cambio de temperatura en la sala. La realización del modelo matemático de comportamiento es un objetivo ambicioso y de gran interés.
- Integración del microcontrolador en la placa PCB: Como se ha explicado, el material del que se dispone en la universidad no permite la realización de pistas de una separación como la que requiere el micro, sin embargo, empresas comerciales encargadas de la fabricación de PCBs pueden llevar a cabo esta labor. Aunque esto requiere de un nuevo diseño de la placa puede suponer una reducción del tamaño lo que puede ser de gran interés.
- Aunque se ha instalado un microcontrolador M4 ya que ha sido el microcontrolador que se disponía en un inicio, puede que un microcontrolador M0 sea capaz de llevarla a cabo de la misma manera. El trabajo con un microcontrolador M0 y su posterior inserción puede ver reducido el consumo y el precio de su dispositivo ya que estos son ligeramente más baratos.
- Con una apertura en la caja y diseño de un soporte opaco que al ser insertado por el orificio obstaculice la luz incidente en la fibra se puede conseguir mediciones de negro. Este soporte se encargaría de bloquear la luz en el momento que nosotros queramos sin necesidad de apagar el dispositivo.

- La configuración de lentes de una distancia focal única es de gran complejidad pero es muy posible que la potencia acoplada sea mayor. Aunque la potencia acoplada es elevada de esta manera se puede incluso acoplar más potencia aunque la calibración sea mucho más compleja y posiblemente sea necesario diseñar un soporte perfectamente fijo para poder llevarla a cabo.
- El uso de bombillas deterioradas implica variaciones en potencia que no pueden ser controladas. Mediante una detección de estos errores se puede saber si las medidas de los experimentos realizados son adecuadas o no, además de poder avisar del cambio de bombilla que el dispositivo requiere.

8. TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Conjunto de dispositivos para ensayos (Thorlabs.de).....	8
Ilustración 2: Emisión de cuerpo negro en función de la temperatura	10
Ilustración 3: Espectro de bombilla halógena (Thorlabs.de).....	10
Ilustración 4: Mediciones de pérdidas de potencia de bombilla convencional.....	12
Ilustración 5: Bombilla de deuterio situada en el interior de la fuente AvaLight-DHc	13
Ilustración 6: Fuente de luz AvaLight-DHc Full range Compacte Light Source	13
Ilustración 7: Fuente de luz AvaLight-HAL.....	14
Ilustración 8: Potencia relativa de las tres configuraciones de la fuente AvaLight-HAL.....	14
Ilustración 9: Fuente de luz HL-2000.....	16
Ilustración 10: Fuente de luz Alphabright	17
Ilustración 11: Estabilidad de fuente alphabright	18
Ilustración 12: Stabilized Broadband Light Source SLS201	19
Ilustración 13: Fuente de luz ASB-W-030 30W High stability Tungsten-Halogen Light Source	20
Ilustración 14: Fuente de luz blanca ASBN-W High power Tungsten-Halogen Light Source	21
Ilustración 15: Características de fuente de luz ASBN-W High power Tungsten-Halogen Light Source.....	22
Ilustración 16: Fuente de luz getLight 3093-SET	23
Ilustración 17: Fuente de alimentación externa	27
Ilustración 18: Fuente de alimentación conmutada interna (Alimentación de bombillas halógenas paneles domóticos UPNA)	28
Ilustración 19: Clasificación de filamentos.....	31
Ilustración 20: Philips 7027	32
Ilustración 21: Philips 7023	32
Ilustración 22: Philips 13189	32
Ilustración 23: Reflector CM127-010-G01	33
Ilustración 24: Lente LA15140.....	34
Ilustración 25: Configuraciones lente plano convexa. Primera Distancia focal difusa. Segunda distancia focal única.....	35
Ilustración 26: Sistema óptico uno (alfabricht.com)	35
Ilustración 27: sistema óptico 2, dos lentes planoconvexas	36
Ilustración 28: Perfil 1	38
Ilustración 29: Perfil 2	39
Ilustración 30: Perfil catálogo Bosch	39
Ilustración 31: Perfil 20x60 Tipo-I	39
Ilustración 32: Lentes y soportes para lentes con la estructura de fijación.....	40
Ilustración 33: Sistema óptico previo a inserción en la caja	41
Ilustración 34: Sistema óptico dentro de caja.....	42
Ilustración 35: Alimentador externo conmutado GSM60A12-P1J.....	46
Ilustración 36: Alimentador interno Traco Power.....	47
Ilustración 37: Gráfico con pérdidas a lo largo de una hora y media	49
Ilustración 38: Fuente de alimentación regulada (switch regulator).....	50
Ilustración 39: Controlador buck (Wikipedia)	51
Ilustración 40: esquema del regulador BTS5016SDA.....	51
Ilustración 41: Pines del dispositivo	52
Ilustración 42: Esquema del circuito final en LT Spice	53

Ilustración 43: ARM Cortex-M family	54
Ilustración 44: Placa de desarrollo FRDM-K22F	55
Ilustración 45: Puente JTAG SWD mini.....	58
Ilustración 46: Amplificador operacional en configuración no inversora	59
Ilustración 47. SWD conector.....	60
Ilustración 48: Diversos circuitos en Protoboard y adaptadores PCB.....	61
Ilustración 49: Esquemático Design Spark	62
Ilustración 50: Capa superior y capa inferior del PCB	63
Ilustración 51: Microcontrolador en placa comercial de 100 pines.....	64
Ilustración 52: Sensibilidad del fotodiodo.....	66
Ilustración 53: Dispositivo final (cerrado)	67
Ilustración 54: Dispositivo final (abierto)	67
Ilustración 55: Variación potencia escala ampliada	68
Ilustración 56: Variación de potencia escala real.....	69
Ilustración 57: Variación espectral.....	70
Ilustración 58: Variación espectral (ampliada).....	71
Ilustración 59: Espectro led referencia y halógena.....	73
Ilustración 60: Comparación fuente diseñada y spectralproducts negra	74

9. BIBLIOGRAFÍA

Información

- Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_light_sources
- Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Light>
- Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_%28optics%29
- Configuración de lentes
<http://folk.uio.no/walman/Publications/Master/node8.html>
- Freescale página oficial:
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=FRDM-K22F
- Comunidad Freescale:
<https://community.freescale.com/welcome>
- MCU on Eclipse, programación y debugging:
<http://mcuoneclipse.com/2013/04/21/using-the-freedom-board-as-jtag-programmer/>
- Bombillas halógenas:
<http://www.intl-lighttech.com/applications/light-sources/tungsten-halogen-lamps>
- Perfiles aluminio:
<http://www.motedis.co.uk/shop/Old/Slot-profiles/Profile-20-I-Type-slot-5/Aluminium-Profile-20x60-I-Type-slot-5::499.html>
- Perfiles Bosch:
<http://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/basic-mechanic-elements/index>
- Apuntes de la asignatura Fabricación y Ensayo de Equipos Electrónicos
- Arduino: <http://www.arduino.cc/>

Tiendas de dispositivos y características

- <http://www.alphabright.com/alphabright.php>
- <http://www.spectralproducts.com/lightsources>
- Bombilla halógena: <http://www.svetila.com/es/de-bombillas-de-luz-66/lamparas-especiales-987/sin-reflector-1059/7027-brl-bcd-50w-12v-g6-35-8835.html>
- <http://oceanoptics.com/>
- <http://www.edmundoptics.com/index.cfm>
- <http://www.thorlabs.de/>
- <http://www.avantes.com/products/light-sources>

Tiendas de componentes y datasheets de elementos utilizados.

- <http://es.rs-online.com/web/>
- <http://es.farnell.com/>
- <http://www.mouser.es/>
- <http://www.digikey.com/>

10. ANEXOS

10.1. CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR

A continuación se presenta el código principal cargado en el microcontrolador. Las funciones empleadas pertenecen a librerías que el propio Kinetis Design Studio las cuales vienen en la versión SDK 1.0.0 (incorpora la base de datos del microcontrolador MK22FN512VLH12).

```

/* #####
**  Filename   : main.c
**  Project    : Processor_Placa
**  Processor  : MK22FN512VLH12
**  Version    : Driver 01.01
**  Compiler   : GNU C Compiler
**  Date/Time  : 2015-05-11, 09:18, # CodeGen: 0
**  Abstract   :
**    Main module.
**    This module contains user's application code.
**  Settings   :
**  Contents   :
**    No public methods
**
** #####*/
/*!
** @file main.c
** @version 01.01
** @brief
**    Main module.
**    This module contains user's application code.
*/
/*!
** @addtogroup main_module main module documentation
** @{}
*/
/* MODULE main */

/* Including needed modules to compile this module/procedure */
#include "Cpu.h"
#include "Events.h"
#include "osa1.h"
#include "hmTim1.h"
// #include "uartCom1.h"
#include "adConv1.h"
#include "adConv2.h"
#include "pin_init.h"
#include "flexTimer1.h"
#include "pitTimer1.h"
// #include "lpuartCom1.h"
#include "watchdog1.h"

```

```

#if CPU_INIT_CONFIG
#include "Init_Config.h"
#endif
/* User includes (#include below this line is not maintained by Processor Expert) */
/*
 * Copyright (c) 2013 - 2014, Freescale Semiconductor, Inc.
 * All rights reserved.
 *
 * Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification,
 * are permitted provided that the following conditions are met:
 *
 * o Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list
 * of conditions and the following disclaimer.
 *
 * o Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this
 * list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or
 * other materials provided with the distribution.
 *
 * o Neither the name of Freescale Semiconductor, Inc. nor the names of its
 * contributors may be used to endorse or promote products derived from this
 * software without specific prior written permission.
 *
 * THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS "AS IS" AND
 * ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED
 * WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE
 * DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT HOLDER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR
 * ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES
 * (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES;
 * LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON
 * ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT
 * (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS
 * SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.
 */

////////////////////////////////////
// Includes
////////////////////////////////////

// Standard C Included Files
#include <stdio.h>
#include <string.h>

// SDK Included Files
//#include "board.h"
#include "fsl_ftm_driver.h"
#include "fsl_os_abstraction.h"

////librerias extra para el funcionamiento del adc
#include "fsl_clock_manager.h"
#include "fsl_device_registers.h"
#include "fsl_adc16_driver.h"

```

```

//////////////////////////////////// librerias para el timer //////////////////////////////////////
#include "fsl_pit_common.h"
#include "fsl_pit_driver.h"
#include "fsl_pit_hal.h"
#include "fsl_pit_irq.h"

#ifdef DEBUG
#include "fsl_debug_console.h"
#endif

// definimos la configuración del dispositivo

//////////////////////////////////// libreria interrupción
#include "fsl_interrupt_manager.h"

// #define DISABLE_WDOG 1;

////////////////////////////////////
// Definitions
////////////////////////////////////

// variables globales
////////////////////////////////////

volatile bool conversionCompleted = false;
uint32_t adcValue = 0;
uint32_t adcValue2 = 0;
uint8_t menu=0;
uint32_t pit=0;
uint8_t num=0;
uint16_t entrada=0;

// variables ADC
adc16_user_config_t *g_adcConfig;
adc16_user_config_t *g_adcConfig2;
adc16_chn_config_t *g_chnConfig;
adc16_chn_config_t *g_chnConfig2;

adc16_calibration_param_t g_adcCalibrationParam;

int potflag=0;

//////////////////////////////////// variables datos
int cont=0;
int cont2=0;
int mediadatvect[]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
int32_t sens;
//float sens;

```

```

int mediadat2vect[]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
////////////////////////////////////PID
//int32_t seterr;
float seterr;
float curr_feedback;
float pidout;
float change;

////////////////////////////////////variables PID////////////////////////////////////
float Kgain=0.5;      // IGanancia
float Ti=0.0001;     // Constante de integración, no se usa
float Td=0;          // Constante de derivación, no se usa
float delT=0.1;      // intervalo de tiempo, no se usa

//// setpoint
uint32_t setpt;      // Referencia
//// estado del controlador
float integral=0;    // Suma de errores
float deriv;        // error previo

ftm_pwm_param_t ftmParam = {////// configuración del PWM
    .mode          = kFtmEdgeAlignedPWM,
    .edgeMode      = kFtmLowTrue,
    .uFrequencyHZ  = 500,
    .uDutyCyclePercent = 10000,
    .uFirstEdgeDelayPercent = 0,
};
uint32_t dcicle=10000;
int32_t dcicle2;
//SystemInit();
////////////////////////////////////
// Code
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////
// Interrupt
////////////////////////////////////
/*void WDOG_IRQHandler()
{
    WDOG_DRV_Deinit();
    //WDOG_DRV_GetResetCount();
}*/
void PitIQRHandler(void){ ///interrupción de control
    num++;
    ////////////////////////////////// control
    //////////////////////////////////u = -kp * (err + integral(err) / Ti + deriv(err) * T)

    //ftmParam.uDutyCyclePercent=dcicle;
    dcicle2=10000-dcicle;
    setpt=dcicle2*4094/10000;

```

```

        sens=(mediadatvect[0]+mediadatvect[1]+mediadatvect[2]+mediadatvect[3]+mediadat
vect[4]+mediadatvect[5]+mediadatvect[6]+mediadatvect[7]+mediadatvect[8]+mediadatvect[9
]+mediadatvect[10]+mediadatvect[11]+mediadatvect[12]+mediadatvect[13]+mediadatvect[14
]+mediadatvect[15]+mediadatvect[16]+mediadatvect[17]+mediadatvect[18]+mediadatvect[19
])/20;
        curr_feedback=sens;
        seterr = curr_feedback-setpt;
        // respuesta proporcional
        pidout = seterr;

/*
        pidout += integral*delT/Ti;
        integral+= seterr;
*/
/*
        change = seterr - deriv;
        pidout += change*Td/delT;
        deriv= seterr;

*/

        pidout *= -Kgain;
        ftmParam.uDutyCyclePercent==pidout;
        //Driver controler Output

}

//////////
// Configuration
//////////
void adc_config(void)
{
    // Allocate memory for configuration structures to avoid memory overwrites
    g_adcConfig = (adc16_user_config_t *)OSA_MemAlloc(sizeof(adc16_user_config_t));
    g_adcConfig2 = (adc16_user_config_t *)OSA_MemAlloc(sizeof(adc16_user_config_t));
    g_chnConfig = (adc16_chn_config_t *)OSA_MemAlloc(sizeof(adc16_chn_config_t));
    g_chnConfig2 = (adc16_chn_config_t *)OSA_MemAlloc(sizeof(adc16_chn_config_t));

    // Calibrate ADC
    ADC16_DRV_GetAutoCalibrationParam(0, &g_adcCalibraitionParam);
    ADC16_DRV_SetCalibrationParam(0, &g_adcCalibraitionParam);

    ADC16_DRV_GetAutoCalibrationParam(1U,&g_adcCalibraitionParam);
    ADC16_DRV_SetCalibrationParam(1U,&g_adcCalibraitionParam);

    // Configure ADC for blocking mode
    ADC16_DRV_StructInitUserConfigDefault(g_adcConfig);
    ADC16_DRV_StructInitUserConfigDefault(g_adcConfig2);
    g_adcConfig->continuousConvEnable = true;
    g_adcConfig2->continuousConvEnable = true;
    ADC16_DRV_Init(0, g_adcConfig);

```

```

ADC16_DRV_Init(1U, g_adcConfig2);//2

// Trigger channel
g_chnConfig->chnNum = 8U;
g_chnConfig->diffEnable= false;
g_chnConfig->intEnable = false;
g_chnConfig->chnMux = 0U;

g_chnConfig2->chnNum = 9U;
g_chnConfig2->diffEnable= false;
g_chnConfig2->intEnable = false;
g_chnConfig2->chnMux = 1U;

ADC16_DRV_ConfigConvChn(0, 0U, g_chnConfig);
ADC16_DRV_ConfigConvChn(1U, 0U, g_chnConfig2);
}

void adc_init(void)
{
    adc16_user_config_t adcUserConfig;
    uint32_t instance=1U;

    ADC16_DRV_StructInitUserConfigDefault(&adcUserConfig);
    adcUserConfig.intEnable = true;
    adcUserConfig.resolutionMode = kAdcResolutionBitOf16;
    adcUserConfig.hwTriggerEnable = true;
    adcUserConfig.continuousConvEnable = false;
    adcUserConfig.clkSrcMode = kAdcClkSrcOfAsynClk;
    ADC16_DRV_Init(instance, &adcUserConfig);

    ADC16_DRV_Init(0U, &adcUserConfig);
}

void init_pir(void){

    //////////////////////////////////////////// conf Pit
    pit_user_config_t PitUserConfig= {
        .isInterruptEnabled = true, //Desabilitadas las interrupciones por el
timer
        .isTimerChained = false, //mmeaningless for tiemr 0
        .periodUs = 100000U //periodo del timerr
100000 us
    };
    // Initalize PIT instance 0. Timers will stop running in debug mode
    PIT_DRV_Init(0, 1);

    //Initialize PIT instance 0, timer 0.
    PIT_DRV_InitChannel(0, 0, &PitUserConfig);

    //función claback de la interrupción

```

```

PIT_DRV_InstallCallback(0 , 0, PitIQRHandler);

PIT_DRV_StartTimer(0,0);

INT_SYS_EnableIRQ(48);
INT_SYS_EnableIRQGlobal();
}
/*void SysTick_Handler(void){}
/*!
*
*
*
*
*   Main////////////////////////////////////// PROGRAMA
PRINCIPAL
*/
int main(void)
{
    //SysTick_Handler();
    ftm_user_config_t ftmInfo;
    SystemInit();
    // Configure board specific pin muxing
    hardware_init();
    configure_adc_pins(HW_ADC0);
    configure_adc_pins(HW_ADC1);

    OSA_Init();
    // Initialize UART terminal
    //dbg_uart_init();

    // Inicializacion del ADC
    // adc_config();

    // Print a note to show the start of demo
    //printf("\r\nWelcome to FTM PWM demo!\n\n\r");

    configure_ftm_pins(0);
    memset(&ftmInfo, 0, sizeof(ftmInfo));

    //pin_mux_GPIO(2);
    //pin_mux_GPIO(1);
    ftmInfo.syncMethod = kFtmUseSoftwareTrig;
    FTM_DRV_Init(0, &ftmInfo);
    //adc_init();
    dcicle=10000;
    ftmParam.uDutyCyclePercent=10000;
    OSA_TimeDelay(500);

    while(dcicle>300){
        ftmParam.uDutyCyclePercent=dcicle;
        FTM_DRV_PwmStart(0, &ftmParam, 4);
    }
}

```



```

        FTM_HAL_SetSoftwareTriggerCmd(g_ftmBaseAddr[0], true);
        OSA_TimeDelay(10);
        dcicle=dcicle-100;
    }

    OSA_TimeDelay(100);
    dcicle=300;
    ftmParam.uDutyCyclePercent=300;

    //while(1);
    ADC16_DRV_Init(0U,0U);
    ADC16_DRV_Init(1U,0U);
    adc_config();

    while(cont<=19){
        adcValue=ADC16_DRV_GetConvValueRAW(0U, 0U);
        mediadatvect[cont]=adcValue;
        cont++;
    }
    cont=0;
    init_pir();
    ////////////////////////////////////////BUCLE INFINITO
    while(1)
    {
        pit=PIT_DRV_ReadTimerCount(0,0);
        FTM_DRV_PwmStart(0, &ftmParam, 4);
        // Issue a software trigger to update registers
        FTM_HAL_SetSoftwareTriggerCmd(g_ftmBaseAddr[0], true);

        //ADC16_DRV_WaitConvDone(BOARD_DAC_DEMO_ADC_INSTANCE, 0U);
        adcValue=ADC16_DRV_GetConvValueRAW(FSL_ADCONV1,0U);
        ////////////////////////////////////////
        adcValue2=ADC16_DRV_GetConvValueRAW(FSL_ADCONV2,0U);
        // vector de almacenamiento de datos
        mediadatvect[cont]=adcValue;
        cont++;
        if(cont>19){
            cont=0;
        }

        while(cont2<=19){
            cont2++;
        }

        //////////////////////////////////////// Control de intensidad con potenciómetro
        ////////////////////////////////////////

        if(entrada<1000){ ////milisegundos para parar el control de potencia
            dcicle=4400-adcValue2;
            entrada++;

```

```

    }
    potflag=4400-dcicle-adcValue2;
    if(potflag<=-300)
    {
        entrada=0;
    }
    if(potflag>=300)
    {
        entrada=0;
    }
    //////////////////////////////////////
// delay 50ms
OSA_TimeDelay(10);
/*if((menu==0)){

    if((GPIO_HAL_ReadPinInput(PTC,1)==0)){
        dcicle=dcicle+100;
    }
    if((dcicle>9999)){
        dcicle=9999;
    }
    if((GPIO_HAL_ReadPinInput(PTB,17)==0)){
        dcicle=dcicle-100;
    }
    if((dcicle<300)){
        dcicle=300;
    }

if((GPIO_HAL_ReadPinInput(PTB,17)==0&&GPIO_HAL_ReadPinInput(PTC,1)==0)){
    menu=1;
    }
}
else{
    if((GPIO_HAL_ReadPinInput(PTC,1)==0)){
        ftmParam.uFrequencyHZ=ftmParam.uFrequencyHZ+100;
    }
    if((ftmParam.uFrequencyHZ>100000)){
        ftmParam.uFrequencyHZ=100000;
    }
    if((GPIO_HAL_ReadPinInput(PTB,17)==0)){
        ftmParam.uFrequencyHZ=ftmParam.uFrequencyHZ-100;
    }
    if((ftmParam.uFrequencyHZ<1000)){
        ftmParam.uFrequencyHZ=1000;
    }
    if((GPIO_HAL_ReadPinInput(PTB,17)==0&&GPIO_HAL_ReadPinInput(PTC,1)==0)){
        menu=0;
    }
}

    //setpt=ftmParam.uDutyCyclePercent*4094/10000;
    // printf("\r\n\r\nADC Value: %d \tDcicle: %d \tDutty cycle: %d \tSetpt:
%d \tNum:%d\r\n", adcValue, dcicle, ftmParam.uDutyCyclePercent, sens ,num);

```

```

    */
}

/*lint -save -e970 Disable MISRA rule (6.3) checking. */
//int main(void)
/*lint -restore Enable MISRA rule (6.3) checking. */
//{
/* Write your local variable definition here */

/** Processor Expert internal initialization. DON'T REMOVE THIS CODE!!! */
// PE_low_level_init();
/** End of Processor Expert internal initialization.          */

/* Write your code here */
/* For example: for(;;) { } */

/** Don't write any code pass this line, or it will be deleted during code generation. */
/** RTOS startup code. Macro PEX_RTOS_START is defined by the RTOS component. DON'T
MODIFY THIS CODE!!! */
#ifdef PEX_RTOS_START
    PEX_RTOS_START();          /* Startup of the selected RTOS. Macro is defined by the RTOS
component. */
#endif
/** End of RTOS startup code. */
/** Processor Expert end of main routine. DON'T MODIFY THIS CODE!!! */
for(;;){}
/** Processor Expert end of main routine. DON'T WRITE CODE BELOW!!! */
}/** End of main routine. DO NOT MODIFY THIS TEXT!!! */

/* END main */
/*!
** @}
*/
/*
** #####
**
** This file was created by Processor Expert 10.4 [05.11]
** for the Freescale Kinetis series of microcontrollers.
**
** #####
*/

```