



Universidad de Valladolid

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño y fabricación de un sistema
electrónico para la caracterización
óptica de diodos láser**

Grado en Ingeniería de Tecnologías Específicas de Telecomunicación
Mención en Sistemas Electrónicos

Autor:

Guillermo CAMINERO
FERNÁNDEZ

Tutores:

Dr. Iván SANTOS TEJIDO
Dr. Jesús ARIAS ÁLVAREZ

Valladolid, 15 de julio de 2016

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

Resumen

Departamento de electricidad y electrónica

Grado en Ingeniería de Tecnologías Específicas de Telecomunicación
Mención en Sistemas Electrónicos

Diseño y fabricación de un sistema electrónico para la caracterización óptica de diodos láser

por Guillermo CAMINERO FERNÁNDEZ

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el diseño y fabricación de un sistema para permitir la caracterización óptica de cualquier fuente emisora de luz. En particular, orientado a la caracterización de diodos láser. Para dar cumplimiento a este objetivo, el TFG se basa en trabajos previos desarrollados en prácticas de empresa en las que se estudiaron los componentes disponibles y se fabricó la placa de circuito impreso. Por lo tanto, el desarrollo del trabajo se centra en la programación del software tanto en el ordenador como en el microcontrolador.

El sistema engloba, como elementos principales: un monocromador (que separa una estrecha banda de longitud de onda de la luz emitida), una placa de circuito impreso *PCB* (que incluye el microcontrolador encargado del hardware), un software en el ordenador (que se responsabiliza de la comunicación con el microcontrolador y el procesamiento de los datos adquiridos).

Palabras Clave:

Análisis espectral, LED, láser, monocromador, fotodiodo, QT, LPC2103, PCB, HTC-1500, LDD100-1P, HMS564, LDM4407.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

Abstract

Departamento de electricidad y electrónica

Degree in engineering specific telecommunication technologies, mention in Electronic Systems

Design and manufacture of an electronic system for the optical characterization of laser diodes

by Guillermo CAMINERO FERNÁNDEZ

The main purpose of this project is the design and manufacture of an electronic system to allow the optical characterization of any light emitting source. In particular, it is oriented to the characterization of laser diodes. To fulfill this objective, the project is based on previous work developed in the company practices, where the available components was studied and the printed circuit board was manufactured. Therefore, the work development is focused on programming the computer software as well as the microcontroller program.

The system includes, as main elements: a monochromator (which separates a narrow band wavelength of the emitted light), a printed circuit board PCB (which includes the microcontroller responsible of the hardware) and a software in the computer (which is responsible of the communication with the microcontroller and processing the acquired data).

Keywords:

Spectral analysis, LED, laser, monochromator, photodiode, QT, LPC2103, PCB, HTC-1500, LDD100-1P, HMS564, LDM4407.

Agradecimientos

Quisiera dedicar el agradecimiento a todas aquellas personas que se han prestado para hacer posible la realización de este trabajo fin de grado.

Cabe destacar la ayuda de los tutores del trabajo Dr. Iván Santos Tejido y Dr. Jesús Arias Álvarez por todo el apoyo dado, además de la orientación y seguimiento durante los meses de la realización del trabajo. Han mostrado mucha dedicación y han estado siempre presentes para la resolución de cualquier problema que surgiese.

De igual manera, mi agradecimiento al Dr. Jesús M. Hernandez Mangas por su apoyo y paciencia, así como por los materiales facilitados sin los cuales la realización se hubiese extendido.

No se puede quedar fuera de mi agradecimiento el Departamento de Electricidad y Electrónica de la Universidad de Valladolid, que han facilitado el acceso al laboratorio de trabajo, entre otras cosas.

Por otro lado, y no menos importante, me gustaría dar las gracias a mi familia por su gran apoyo y cariño durante todos los años del recorrido académico y en la realización del proyecto. También quisiera agradecer el apoyo de mi novia por la ayuda con la tediosa tarea de la revisión gramatical y su paciencia durante toda la realización del trabajo.

Gracias a todos.

Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Agradecimientos	VII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Introducción	2
1.3. Objetivos	4
2. Programación del microcontrolador	7
2.1. Configuración del puerto GPIO	8
2.1.1. Configuración de los pines	8
2.1.2. Configuración de las entradas y salidas	10
2.1.3. Control de los pines de propósito general	11
2.2. Configuración de la UART	11
2.2.1. UART0 (PC)	12
2.2.2. UART1 (Monocromador)	14
2.3. Configuración del periférico SPI	15
2.3.1. Comando de escritura	16
2.3.2. Registros SPI	17
2.4. Funcionamiento del microcontrolador. Diagramas de flujo	19
2.4.1. Función main	20
2.4.1.1. Comandos para el monocromador	20
2.4.1.2. Comandos para LED	22
2.4.1.3. Comandos para láser	24
2.4.2. Función CONNX	28
2.4.3. Función LEDGT	30
2.4.4. Función LEDSC	33
2.4.5. Función LEDTR	36
3. Programación del PC	37
3.1. Programación GUI QT	37
3.1.1. Menú principal	38
3.1.2. MENÚ LED	39
3.1.2.1. Pestaña "Scan"	40
3.1.2.2. Pestaña "Last Scans"	50
3.1.2.3. Pestaña "Installation"	50
3.1.3. MENÚ LASER	56
3.1.3.1. Calibración del sensor de temperatura	58
3.1.3.2. Calibración del monocromador	61

3.2.	Calibración del fotodiodo	61
3.3.	Permisos para la comunicación con el microcontrolador	64
3.4.	Instalador del programa	65
4.	Análisis de resultados	69
4.1.	Análisis sobre el diseño eléctrico	69
4.2.	Análisis general de una fuente emisora de luz	71
4.2.1.	Diodo Infrarrojo	72
4.2.2.	Diodo Rojo	74
4.2.3.	Diodo Amarillo	77
4.2.4.	Diodo Verde	79
4.2.5.	Led Blanco	82
4.2.6.	Análisis múltiple	84
4.3.	Análisis de láser	85
4.3.1.	Láser Rojo	85
4.3.2.	Láser Verde	87
5.	Presupuesto económico	91
5.1.	Lista de materiales o BOM	91
5.2.	Fabricación de la placa de circuito impreso	94
5.3.	Horas de trabajo	94
5.4.	Presupuesto final	94
6.	Conclusiones y trabajo futuro	97
6.1.	Conclusiones	97
6.2.	Trabajo futuro	98
6.2.1.	Incorporación del LDD	98
6.2.2.	Incorporación del HTC	99
6.2.3.	Incorporación del LDM	99
6.2.4.	Incorporación del amplificador Lock-In LIA100	99
6.2.5.	Mejora del Software	99
6.2.5.1.	Programación del microcontrolador	99
6.2.5.2.	Programación del software del ordenador	99
6.2.6.	Corrección hardware	100
A.	Estudio de los componentes disponibles	103
A.1.	Objetivos, breve descripción	103
A.2.	Monocromador	103
A.2.1.	Introducción	103
A.2.2.	Componentes del monocromador	104
A.2.2.1.	Rendijas	105
A.2.2.2.	Colimador	105
A.2.2.3.	Red de difracción o grating	105
A.2.3.	Ingeniería inversa realizada	106
A.2.3.1.	Comunicación con el SP-300i	107
A.2.3.2.	Cable Prolific	108
A.2.3.3.	Software original	109
A.2.4.	Comandos del monocromador	116
A.3.	Sensor óptico SI-440	120

A.3.1. Instalación	120
A.3.2. Especificaciones	120
A.4. Controlador de temperatura HTC-1500	121
A.4.1. Funcionamiento y descripción	122
A.4.2. Estructura interna del HTC-1500	123
A.4.3. Elección de los componentes para el HTC	125
A.5. Controlador de diodos láser LDD100-1P	131
A.5.1. Funcionamiento y descripción	131
A.5.2. Modo de operación en potencia constante	134
A.5.3. Modo de operación en corriente constante	135
A.6. Soporte para diodos láser con control de temperatura LDM4407	136
A.6.1. Funcionamiento y descripción	136
A.6.2. Configuración de la montura	137
A.6.2.1. Instalación del diodo	138
A.6.3. Módulo termoelectrico	138
A.6.4. Sensor de temperatura del LDM	139
A.6.5. Conexiones	140
A.7. Amplificador de corriente HMS564	141
A.7.1. Funcionamiento y estructura interna del HMS564	142
A.8. Fuente de alimentación Calex 32000 Series	146
A.8.1. Estructura interna de la fuente	147
A.9. Amplificador LOCK-IN LIA100	148
B. Diseño eléctrico del sistema de caracterización	151
B.1. Antecedentes del trabajo	151
B.2. Descripción general	152
B.3. Componentes del nuevo sistema	153
B.4. LPC2103	155
B.4.1. UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)	156
B.4.1.1. Introducción al protocolo serie asíncrono	156
B.4.1.2. UART0	157
B.4.1.3. UART1	158
B.4.2. ADC o Convertidor Analógico Digital	159
B.4.3. SPI Serial Peripheral Interface	160
B.4.4. GPIO o General Purpose Input Output	161
B.5. Controlador de diodos láser LDD100-1P	163
B.6. Fuente de corriente Wilson	163
B.7. Controlador de temperatura HTC1500	164
B.8. Convertidor Digital a Analógico o DAC	165
B.9. Alimentación	166
B.9.1. Análisis térmico	169
B.10. Acondicionamiento de la señal del fotodiodo	170
B.10.0.1. Amplificación externa. HMS564	171
B.10.0.2. Amplificación interna. PGA	172
B.11. Diseño de la PCB	173
B.11.1. Especificaciones del fabricante	173
B.11.2. PCB escogida	174
B.11.3. Proceso de fabricación	174

B.11.4. Modelado 3D	176
C. Hojas de especificaciones	179
C.1. Thermistor Dale	179
C.2. Diseño eléctrico	181
C.3. Diseño del layout (Top Copper, Bottom Copper, Top silk)	188
C.4. Normal Condition of PCB capabilities	192
C.5. PCB Panelization Rules	194
C.6. Requirements on the PCB Design	198
C.7. Gerber Files Requirements	200
Bibliografía	203

Índice de figuras

1.1. Conexiones básicas del diseño	3
2.1. Esquema de las conexiones del sistema	8
2.2. Configuración de los pines del LPC2103	9
2.3. Esquema de los comandos de fin de línea	15
2.4. Comando de escritura del convertidor digital a analógico	16
2.5. Secuenciación de las tramas <i>SPI</i> para el convertidor	17
2.6. Diagrama de flujo principal. Sección de control del monocromador	21
2.7. Diagrama de flujo principal. Sección de control de LED's	23
2.8. Tipos de análisis espectrales	24
2.9. Análisis térmicos para el <i>ADL-65074TR/L</i> de AlGaInP	25
2.10. Potencia óptica frente a corriente para cada temperatura	26
2.11. Diagrama de flujo principal. Sección de control de láser	27
2.12. Diagrama de flujo de la comprobación de conexión con el monocromador	29
2.13. Diagrama de flujo del comando encargado de enviar al monocromador a una longitud de onda	32
2.14. Diagrama de flujo de la función encargada de realizar el análisis espectral	35
2.15. Diagrama de flujo de la función terminal	36
3.1. Diagrama de flujo de la función principal del PC	38
3.2. Menú principal del programa del ordenador	39
3.3. Aviso de conexión no establecida	39
3.4. Ventana de análisis de diodos LED	40
3.5. Ventana de análisis de diodos LED con conexión al microcontrolador	41
3.6. Lista de ganancias de entrada disponibles	43
3.7. Diagrama de flujo de la función "GoTo" en el PC	45
3.8. Diagrama de flujo de la función de análisis en el PC	49
3.9. Pestaña de anteriores análisis	50
3.10. Curva de calibración del fotodiodo SI-440 digitalizada	51
3.11. Diagrama de flujo de calibración del offset en oscuridad	52
3.12. Pestaña de instalación del monocromador sin autorización	53
3.13. Pestaña de instalación del monocromador con autorización	54
3.14. Mensajes de información de autenticación	54
3.15. Respuesta de la eficacia luminosa del ojo humano	55
3.16. Respuesta de los conos del ojo humano	55
3.17. Ventana de análisis de diodos láser, medios desconectados	56
3.18. Ventana de análisis de diodos láser, con microcontrolador conectado	57
3.19. Pestaña de opciones del menú de diodos láser	58
3.20. Calculadora de Steinhart	58
3.21. Calibración por medio de la calculadora de Steinhart	59
3.22. Diagrama de flujo de la función de Steinhart	60

3.23. Ventana de calibraciones propias del monocromador	61
3.24. Pasos seguidos en la digitalización	63
3.25. Buscador de UBUNTU para el software	66
3.26. Programa anclado al inicio de UBUNTU	66
3.27. Ventana de bienvenida al proceso de instalación	67
3.28. Ventana de proceso de instalación finalizado	67
4.1. Conexión correcta con el fotodiodo	69
4.2. Filtro FIR	70
4.3. Análisis espectral del diodo infrarrojo	73
4.4. Análisis paramétrico del diodo infrarrojo	73
4.5. Espectro original del diodo infrarrojo	74
4.6. Análisis espectral del diodo rojo	75
4.7. Análisis paramétrico del diodo rojo	76
4.8. Espectro original del diodo rojo (<i>HLMP-3750 de AVAGO</i>)	77
4.9. Análisis espectral del diodo amarillo	78
4.10. Análisis paramétrico del diodo amarillo	78
4.11. Espectro original del diodo amarillo (<i>HLMP-3850 de AVAGO</i>)	79
4.12. Análisis espectral del diodo verde	80
4.13. Análisis paramétrico del diodo verde	81
4.14. Espectro original del diodo verde (<i>HLMP-3950 de AVAGO</i>)	82
4.15. Análisis espectral de un diodo de luz blanca	83
4.16. Carta cromática (CIE 1931) con los colores correspondientes a la mezcla del blanco	83
4.17. Análisis paramétrico del diodo blanco	84
4.18. Análisis espectral múltiple	85
4.19. Análisis espectral del diodo láser rojo	86
4.20. Análisis paramétrico del diodo láser rojo	87
4.21. Análisis espectral del diodo láser verde	88
4.22. Análisis paramétrico del diodo láser verde	88
4.23. Análisis espectral de los láser rojo y verde	89
4.24. Análisis espectral del conjunto de dispositivos analizados	90
6.1. Divisor de tensión planteado como solución	101
6.2. Entrada corregida desde el amplificador externo	102
6.3. Parte del layout que corrige el error en la entrada de datos	102
A.1. Estructura interna del monocromador	104
A.2. Componentes del monocromador	104
A.3. Difracción de un grating	106
A.4. Conexión con el controlador de escaneo	107
A.5. Conexión con el ordenador	107
A.6. Esquema de conexión de alimentación	108
A.7. About SpectraPro	109
A.8. ARC Monochromator Control Software	111
A.9. Menú operación software SpectraPro	112
A.10. Menú Install Grating	113
A.11. Menú Adjust Offset	113
A.12. Menú Adjust Gadjust	114

A.13.Menú Set Defaults	114
A.14.Menú Calibration Values	115
A.15.Rango de resolución del sensor SI-440	121
A.16.CI HTC-1500	122
A.17.Conexión rápida del HTC	123
A.18.Diagrama de bloques internos del HTC	123
A.19.Conexión necesaria para modo bipolar	125
A.20.Rango de funcionamiento seguro del HTC, SOA	126
A.21.Rango de funcionamiento de nuestro HTC	126
A.22.Conexión para corriente límite de salida	126
A.23.Conexión para corriente de polarización del sensor	127
A.24.Conexión del sensor	127
A.25.Configuración para la resistencia de la ganancia proporcional	128
A.26.Configuración de la constante de tiempo integral	129
A.27.Establecimiento de la temperatura	130
A.28.Conexión con el módulo termoelectrico	130
A.29.Circuito integrado LDD-100-1P	131
A.30.Tipos de láser	132
A.31.Rango de funcionamiento seguro del LDD, SOA	133
A.32.Rango de operación particular del LDD	133
A.33.Configuración del LDD en modo potencia constante	134
A.34.Configuración del LDD en modo corriente constante	136
A.35.Soporte para diodos láser	136
A.36.Estructura interna del soporte para diodos láser	137
A.37.Configuración de los interruptores internos	137
A.38.Instalación de los dos tipos de encapsulados láser	138
A.39.Conectores para comunicación	141
A.40.Imagen del amplificador	141
A.41.Esquema principal del HMS	142
A.42.Esquema detallado del funcionamiento interno del HMS	143
A.43.Gráficas de respuesta en frecuencia del amplificador	145
A.44.Entrada del preamplificador HMS564	146
A.45.Fuente de alimentación Calnex 32000 series	147
A.46.Bobinado interno del transformador	147
A.47.Esquema de salida de la fuente de alimentación	148
A.48.Diagrama de bloques del Lock-In	149
B.1. Diseño antiguo del sistema de caracterización de diodos láser	152
B.2. Comunicaciones entre los componentes del sistema	154
B.3. Bloques funcionales del LPC2103	156
B.4. Trama del protocolo serie asíncrono	157
B.5. Conexiones de las UART con el PC y el monocromador	159
B.6. Conexiones del microcontrolador LPC2103	162
B.7. Esquema eléctrico del LDD100-1P y diseño de la fuente de corriente Wilson	163
B.8. Esquema eléctrico del HTC1500 y DAC	164
B.9. Alimentación del sistema de caracterización óptica	167
B.10. Acondicionamiento de la señal de entrada	171

B.11. Resultado del diseño de la PCB sin planos de tierra	175
B.12. PCB final en el entorno ARES	176
B.13. Vistas del diseño 3D	177

Índice de tablas

2.1. Señales controladas por el puerto GPIO	11
5.1. Estimación de las horas de trabajo totales para la realización del proyecto	94
5.2. Presupuesto final para el proyecto	95
A.1. Test de presencia del monocromador	112
A.2. Comandos de movimiento de la longitud de onda	117
A.3. Comandos de control de grating	118
A.4. Comandos de calibración del grating	119
A.5. Especificaciones para el sensor	121
A.6. Descripción detallada de los pines del integrado	124
A.7. Descripción detallada de los pines del integrado	132
A.8. Tabla de configuración de los interruptores	138
A.9. Características del módulo termoelectrico	139
A.10. Características del preamplificador de corriente HMS	144
A.11. Configuración de los terminales	148
B.1. Entradas y salidas de la PCB	154
B.2. Entradas y salidas del ordenador	155
B.3. Entradas y salidas del monocromador	155
B.4. Entradas y salidas del amplificador de corriente HMS564	155
B.5. Niveles RS232	158
B.6. Descripción de los pines del DAC	166
B.7. Tensión de alimentación principal de los circuitos integrados	167
B.8. Estudio teórico del consumo de corriente de cada circuito integrado	168
B.9. Consumo de corriente y cálculo de potencia para cada tensión	169
B.10. Análisis térmico del circuito	170
B.11. Correspondencia de las señales GAIN0 y GAIN1	172

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La fabricación de diodos led existe de los años sesenta, cuando ya se fabricaban en masa diodos led verdes, rojos y amarillos. El hito de la historia de los diodos led que más se conoce y al que se atribuye mayor importancia, es el reconocimiento del premio nobel de física en 2014 a Shuji Nakamura, Isamu Akasaki y Hiroshi Amano. Recibieron dicho premio, gracias a sus investigaciones en el desarrollo de diodos led de color azul y eficientes. A partir de este momento, y gracias a la posibilidad de fabricación de diodos de luz blanca, el mercado del led ha crecido notablemente. Este avance del mercado no tiene previsto frenarse debido a la demanda y a sus propiedades; como por ejemplo, su bajo consumo, su amplia gama de colores y su bajo coste. Hoy en día, la tecnología LED, se utiliza prácticamente en cualquier dispositivo electrónico, tanto simple como complejo.

Por otra parte, el diodo láser experimenta también un auge en su historia ya que cada día surgen nuevas aplicaciones para este dispositivo. Una de las aplicaciones más importantes que reside en el ámbito de las telecomunicaciones, es lo correspondiente a las comunicaciones ópticas. El aumento de grandes empresas que apuestan por la fibra óptica, hace que la cotización de estos dispositivos se eleve.

Se sabe que el funcionamiento de cualquier dispositivo electrónico se degrada con el uso y también con el paso del tiempo. En especial, en dispositivos de fabricación sobre semiconductores, el desgaste térmico y eléctrico son un problema; sin embargo, el proceso mecánico no lo es. Por este motivo, realizar un análisis en el transcurso del tiempo permite la posibilidad de detectar problemas en la infraestructura de los dispositivos. En el ámbito de diodos láser, esto se conoce como **Dañado Óptico Catastrófico COD**, ocasionado por exceso de corriente o debido a problemas por procesos de foto-oxidación.

Los fabricantes de dispositivos LED, proporcionan las especificaciones de un dispositivo en concreto que han analizado. Esto es un problema, puesto que dichos dispositivos se fabrican en serie y cada uno de ellos es diferente a los demás. Por mucho que los procesos de fabricación puedan llegar a ser muy buenos, siempre existirán pequeñas diferencias en sus características; es decir, nunca serán exactas a las del dispositivo analizado por los fabricantes. Este es uno de los principales motivos para la realización del trabajo.

Todos estos motivos, conducen a la importancia del diseño y a la fabricación de un dispositivo, capaz de analizar las características tanto ópticas como eléctricas de los diodos led y láser. Debido a esto, es de suma importancia llevar a cabo el entendimiento de un sistema de caracterización óptica, sus componentes y relaciones entre ellos. Esto implica un conocimiento mucho más amplio que el simple análisis de los datos obtenidos. Por otro lado, la fabricación de un sistema propio ofrece la posibilidad de fabricarlo a medida, teniendo en cuenta los dispositivos que ya se tienen y pudiendo reducir en notables medidas el coste final del producto.

Dentro del mercado de caracterización óptica de diodos láser, se pueden encontrar distintas empresas que se dedican a la fabricación de estos dispositivos; como por ejemplo: *Newport Corp.*, *Wavelength Electronics*, *Acton research*, etc. Los dispositivos de caracterización óptica que ofrecen son muy caros, por lo que no merece la pena su compra. La utilización de estos equipos por parte de la universidad, no es lucrativa sino que éstos se utilizan para prácticas de asignaturas de optoelectrónica. Por esta razón, y gracias al departamento de Electricidad y Electrónica de la Universidad de Valladolid, se desarrolló como proyecto fin de carrera un equipo de caracterización de diodos láser cuya primera versión consta de Septiembre de 1999, siendo actualizado en años posteriores [11]. Este sistema ha quedado obsoleto por múltiples motivos, por lo que se propone la fabricación de un sistema nuevo.

1.2. Introducción

La finalidad de este trabajo consiste en la fabricación de un dispositivo capaz de realizar caracterizaciones ópticas sobre cualquier fuente emisora de luz. Además, este dispositivo final tiene que unificar y actualizar los equipos de caracterización óptica disponibles en el laboratorio. El estudio y el proceso de fabricación llevado a cabo, se encuentra tanto en el Apéndice A como en el Apéndice B. En ellos se pueden encontrar los detalles y procedimientos seguidos para la fabricación del prototipo.

La base del proyecto es, en sí misma, la caracterización general de una fuente emisora de luz; no obstante, se busca la compatibilidad con proyectos anteriores, los cuales disponen de medios para llevar a cabo el control, tanto eléctrico como térmico de diodos láser.

Entre los proyectos anteriores sobre los que se ha realizado la actualización están:

Título: Diseño hardware de un sistema de caracterización de diodos láser

Autor: Salvador Mateos Velasco

Tutor: Pedro Castrillo Romón

Fecha: Septiembre de 1999

Título: Desarrollo de un software de control para un sistema de caracterización de diodos láser

Autor: Antonio López Martínez

Tutor: Pedro Castrillo Romón

Fecha: Septiembre de 1999

Título: Optimización de un sistema de caracterización de diodos láser

Autor: Antonio Alonso Alegre

Tutor: Pedro Castrillo Romón

Fecha: Marzo 2000

Título: Desarrollo de un sistema de caracterización de diodos láser

Autores: Javier Paniagua Sanz, David Rodríguez Lazo

Tutor: Pedro Castrillo Romón

Fecha: Junio 2001

Los proyectos anteriormente citados, se basan en sistemas operativos antiguos como Windows 3.1 y las tarjetas de adquisición de datos que utilizan se encuentran desfasadas. Por estas razones se plantea la actualización del sistema a una versión actual. Este nuevo equipo tiene previsto funcionar sobre un sistema operativo basado en Linux. Esto ofrece la garantía de que aunque pasen los años, siempre habrá un sistema operativo basado en Linux que sea capaz de ejecutar el nuevo software. También se plantea la utilización de un microcontrolador para realizar todas las tareas de control. Así se consigue un sistema con la capacidad de ser actualizado en el futuro y que se comunica mediante un puerto USB. Puerto que no parece quedar obsoleto pese al paso de los años.

En el Apéndice A se puede ver el estudio realizado sobre los componentes disponibles en el laboratorio. Muchos de estos componentes ya forman parte de los sistemas antiguos de caracterización óptica, por lo que se reutilizarán en el nuevo sistema.

El principal objetivo propuesto, consiste en el control del monocromador ACTON SP300-i y la posterior recogida de los datos proporcionados por el fotodiodo SI-440 acoplado a su rejilla de salida. Las zonas sombreadas en color verde de la Figura 1.1 corresponden con las conexiones respectivas al citado control.

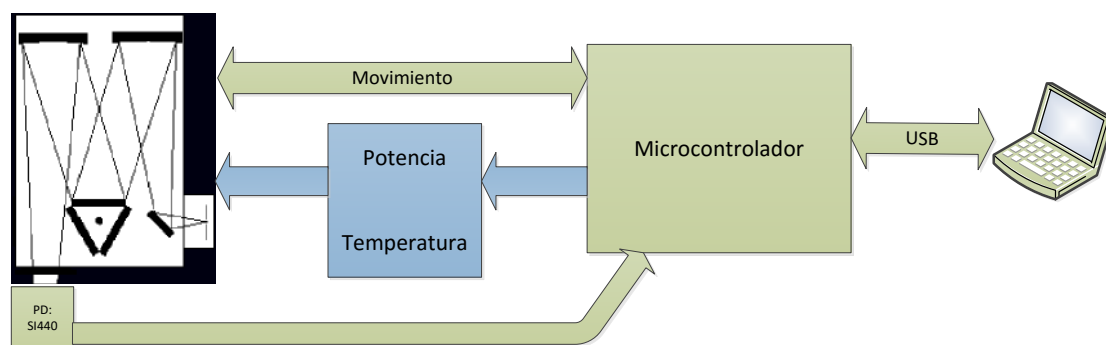


FIGURA 1.1: Conexiones básicas del diseño

En segundo lugar, se propone la caracterización completa de diodos láser. Incluyendo el control de temperatura, con el *HTC-1500*, así como el análisis a potencia o corriente constante, gracias al driver controlador de diodos láser *LDD-100P*. La posición relativa que corresponde a estos dispositivos se puede ver en las conexiones de sombreado azul de la Figura 1.1. El interés de completar los análisis obliga a que se tengan en cuenta todos los componentes tanto en el diseño eléctrico como en el proceso de fabricación y programación. Gracias a la integración de estos dispositivos, se pretende llegar al control absoluto de las características de emisión de un diodo láser, obteniendo así una caracterización completa de los mismos.

El desarrollo del proyecto se va a esquematizar en varios capítulos. En primer lugar, se explica la programación del microcontrolador (Capítulo 2). Más adelante, se detalla la programación del sistema de control del ordenador (Capítulo 3).

Los análisis llevados a cabo durante la realización del proyecto, se pueden encontrar en el Capítulo 4. Estos análisis representan solo una parte de lo que se espera analizar en futuras versiones. Sin embargo, el análisis espectral de los mismos concluye satisfactoriamente en el mismo capítulo.

En el Capítulo 5 se puede encontrar el presupuesto final del proyecto. Debido a que muchos de los componentes ya se encontraban disponibles en el laboratorio, el precio de los mismos se detalla de forma ideológica, ya que no es un precio real. Esto es así, porque el valor de la tecnología en el año que se compró, no tiene el mismo precio que en la actualidad. Por esta misma razón se detalla también el precio en pesetas. Sin embargo, aunque se haya tenido en cuenta el precio de los dispositivos comprados anteriormente, se ha creído conveniente realizar un estudio del precio actual de los mismos dispositivos.

Finalmente, las conclusiones y una lista de aportaciones personales se encuentran en el Capítulo 6. Se han incluido las aportaciones personales en vista a la futura posibilidad de ampliación del trabajo actual.

1.3. Objetivos

El Objetivo principal del presente proyecto es la fabricación de un nuevo dispositivo de caracterización óptica de diodos láser.

Cualquier proyecto de la rama de la electrónica, tiene que englobar una serie de procedimientos. Concretamente, el proceso llevado a cabo a lo largo de este trabajo, consta de los mismos procedimientos de fabricación que cualquier dispositivo. Estos procedimientos se han llevado a cabo durante el transcurso de las prácticas y el trabajo fin de grado de la siguiente forma:

Prácticas en empresa curriculares

- 1 Estudio previo
- 2 Toma de requisitos

Prácticas en empresa extracurriculares

- 3 Diseño eléctrico
- 4 Diseño del layout de fabricación
- 5 Fabricación del prototipo en la PCB

Trabajo fin de grado

- 6 Desarrollo del software embebido
- 7 Desarrollo del software del controlador
- 8 Calibración y resultados finales

Por lo tanto, el objetivo final del presente trabajo, es la fabricación y desarrollo del software para llevar a cabo la caracterización óptica de los diodos (análisis espectral). Además, se tendrá en cuenta su posterior ampliación para el control sobre el análisis eléctrico de los mismos.

Capítulo 2

Programación del microcontrolador

La programación en el microcontrolador o programación embebida, es una de las dos grandes partes de las que se compone este proyecto. La programación del mismo se realiza mediante el lenguaje de programación C.

El microcontrolador escogido es el *LPC2103* estudiado en el apartado B.4. Pertenece a la familia *ARM7*, por lo que es muy conveniente entender cómo funciona y cómo se puede programar. En un primer momento, se ha realizado la programación desde el entorno más cercano a *proteus*, *VSM Studio Project*. Como compilador se ha utilizado el GCC para *ARM* proporcionado por *yagarto*. Más adelante, y por facilitar la programación en un mismo entorno, se pasó a la programación desde el sistema operativo final *UBUNTU*; en el que la programación se puede realizar desde cualquier editor de texto y la compilación gracias a *arm-none-eabi-gcc*.

La programación del microcontrolador engloba varias tareas, como la configuración de los periféricos de comunicación, configuración de los temporizadores, puertos de entrada y salida o pines GPIO, entre otras.

Para la programación correcta del microcontrolador se hace necesario el conocimiento previo de las conexiones del esquema eléctrico, por lo que es conveniente haber entendido el diseño eléctrico del Apéndice B. No obstante, en la Figura 2.1 se pueden ver las conexiones esquematizadas del diseño.

En resumen, el microcontrolador se tiene que encargar de todas las tareas relativas al hardware. Entre las operaciones que tiene que realizar, se encuentran las siguientes:

- Comunicación con el monocromador para controlar su longitud de onda
- Lectura del fotodiodo del monocromador para obtener la corriente fotogenerada
- Control de la temperatura mediante el HTC1500
- Control de la potencia del láser mediante el driver de diodos LDD100-1P
- Comunicación con el ordenador mediante un USB
- Conexiones con el LDM-4407 para que el HTC y el LDD actúen sobre él

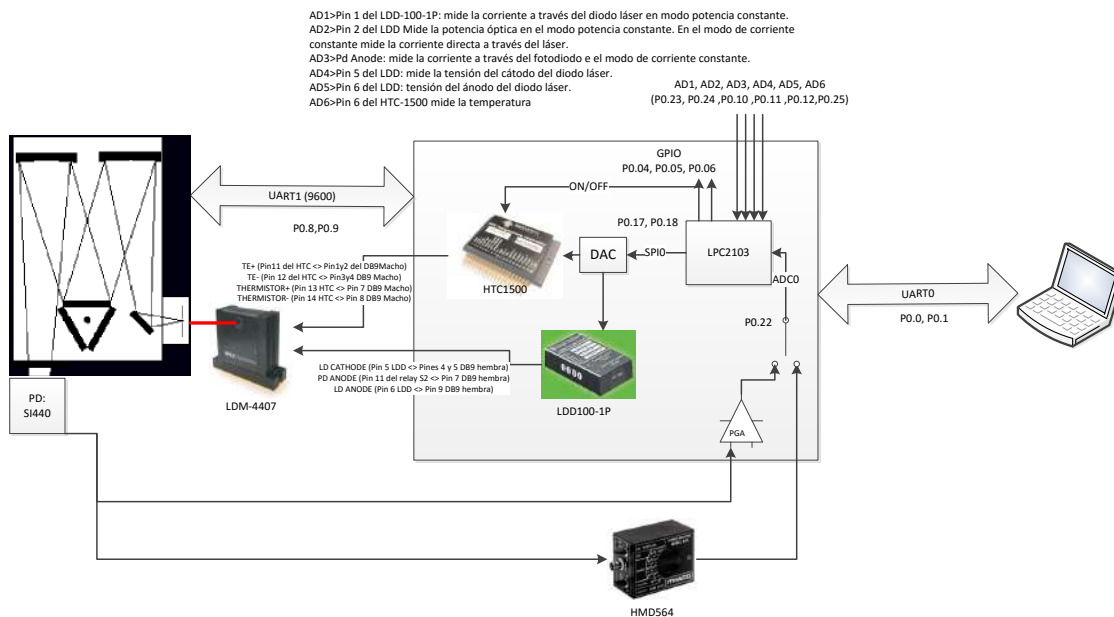


FIGURA 2.1: Esquema de las conexiones del sistema

2.1. Configuración del puerto GPIO

2.1.1. Configuración de los pines

La configuración de los pines del microcontrolador se explica detalladamente en el manual de usuario *UM10161* [13]. A modo resumen, la explicación de la configuración es la siguiente: la mayoría de los pines del microcontrolador tienen varias funciones. Por este motivo, la selección de la funcionalidad de cada pin se define en los registros *PINSEL0* y *PINSEL1*. Estos dos registros de 32 bit definen la funcionalidad de cada pin con 2 bit por pin. La conexión de cada pin se fija con las cuatro opciones binarias que ofrecen estos dos bit. Después de un *RESET*, el microcontrolador configura todos sus pines como propósito general *GPIO* (*PINSEL0*=0,*PINSEL1*=0)

Las diferentes funcionalidades que se les puede atribuir a los distintos pines del microcontrolador se pueden ver en la Figura 2.2.

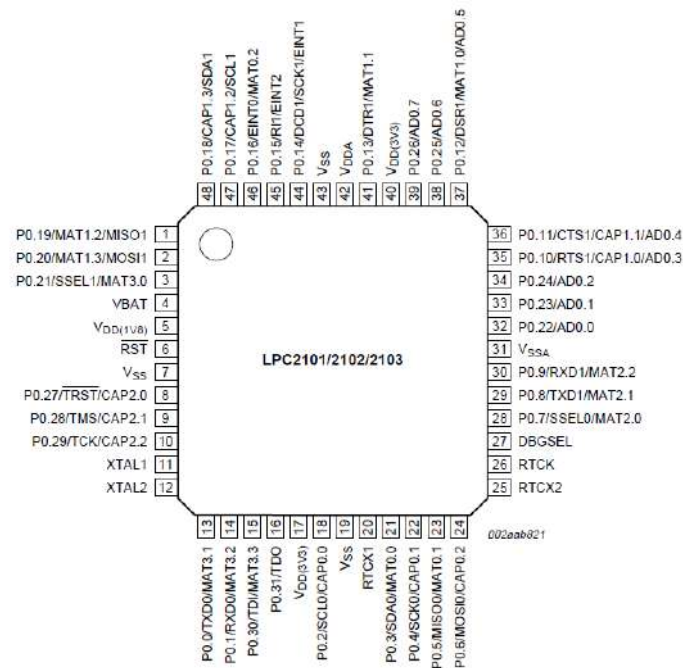


FIGURA 2.2: Configuración de los pines del LPC2103

Como ejemplo ilustrativo para explicar el funcionamiento de estos registros, se tiene lo siguiente:

El pin 13 corresponde a las siguientes funciones: P0.0, TXD0, MAT3.1. Si se quiere definir dicho pin para que funcione como TXD0 (UART0), se deberán fijar los pines correspondientes del PINSEL. En este caso, PINSEL0 y los pines correspondientes 0 y 1. Como es la segunda función que adquiere el pin, el valor correspondiente de los pines será el dos decimal, que en binario corresponde con "01".

El resto de pines se fijan de la misma forma, por lo que la configuración de los registros del PINSEL para el correcto funcionamiento del microcontrolador, se puede ver en el siguiente código 2.1.

```
1 //////////////////////////////////////////////////
2 /*PIN CONFIGURATION*/
3 //////////////////////////////////////////////////
4
5 //PINSEL0
6 //          33222222222211111111110000000000
7 //          10987654321098765432109876543210
8 //P0.0      .....01          TXD0 (UART0)
9 //P0.1      .....01..        RXD0 (UART0)
10 //P0.2      .....00.....    GPIO/NO (I2C)
11 //P0.3      .....00.....    GPIO/NO (I2C)
12 //P0.4      .....01.....    SCK0 (SPI)
13 //P0.5      .....00.....    GPIO
```

```

14 //P0.6      .....01.....    MOSI0 (SPI)
15 //P0.7      .....01.....    SSEL0 (SPI)
16 //P0.8      .....01.....    TXD1 (UART1)
17 //P0.9      .....01.....    RXD1 (UART1)
18 //P0.10     .....11.....    AD0.3 PDANODE
19 //P0.11     .....11.....    AD0.4 LDCATHODE
20 //P0.12     .....11.....    AD0.5 LDANODE
21 //P0.13     ....00.....    GPIO
22 //P0.14     ..00.....    GPIO
23 //P0.15     00.....    GPIO GAIN0 (PGA)
24 //PINSEL0=0b00000011111101010101000100000101;
25
26 PINSEL0 = 0x03F55105;
27
28 //PINSEL1
29 //      33222222222211111111110000000000
30 //      10987654321098765432109876543210
31 //P0.16     .....00.....    GPIO GAIN1 (PGA)
32 //P0.17     .....00.....    GPIO
33 //P0.18     .....00.....    GPIO
34 //P0.19     .....00.....    GPIO _LDAC
35 //P0.20     .....00.....    GPIO _SHDN
36 //P0.21     .....00.....    GPIO LEDLAMP_ONOFF
37 //P0.22     .....11.....    AD0.0 PD_MEASURE
38 //P0.23     .....11.....    AD0.1 CURRENT_MONITOR
39 //P0.24     .....11.....    AD0.2 POWER_MONITOR
40 //P0.25     .....11.....    AD0.6 ACTUAL_TEMP_MONITOR
41 //P0.26     .....00.....    AD0.7 GPIO
42 //P0.27     .....00.....    GPIO HTC_LDD_ONOFF
43 //P0.28     .....00.....    GPIO MODE
44 //P0.29     ....00.....    GPIO
45 //P0.30     ..00.....    GPIO
46 //P0.31     00.....    GPIO
47 //PINSEL1=0b00000000000011111111000000000000;
48
49 PINSEL1 = 0x000FF000;

```

CÓDIGO 2.1: Configuración de los registros PINSEL

2.1.2. Configuración de las entradas y salidas

Otras de las configuraciones principales que hay que realizar sobre el microcontrolador a la hora de programar su funcionalidad, es la de definir cuáles de sus pines de propósito general son de entrada y cuáles son de salida.

En el apartado 2.1.1, ya se ha realizado la configuración de los pines, por lo que el siguiente paso es configurar la dirección. Para este propósito, se tiene el registro *IODIR* (de 32 bits). Dicho registro define si el pin es de entrada o salida, dependiendo de si en su posición tiene un “0” o un “1”, respectivamente.

En el código 2.2 se puede ver la configuración realizada.

```

1 ///////////////////////////////////////////////////
2 /*IN - OUT selection*/
3 ///////////////////////////////////////////////////
4
5 //IN: 1, 9, 10, 11, 12, 14, 22, 23, 24, 25, 26

```

```

6 //OUT:0,2,3,4,5,6,7,8,13,15,16,17,18,19,20,21,27,28,29,30,31
7
8 //      33222222222111111111100000000000
9 //      10987654321098765432109876543210
10 //IODIR = (0b11111000001111111010000111111101);
11
12 IODIR = 0xF83FA1FD;

```

CÓDIGO 2.2: Configuración del registro IODIR

2.1.3. Control de los pines de propósito general

En este apartado, es importante saber si dichos pines son de entrada o de salida, ya que la función que se realiza sobre ellos es distinta en cada caso.¹ Por un lado, si el pin es de entrada, se puede leer el valor (digital) de ese pin. Este valor se puede encontrar en el registro *IOPIN*, que almacena el valor de cada pin en todo momento. Por otro lado, si el pin es de salida, se puede modificar el valor de dicha salida ofreciendo un “0” o un “1”. El registro encargado de esta tarea es el registro *IOPIN*, que permite modificar el valor de los pines. Hay que tener en cuenta que este registro modifica el puerto entero de pines, por lo que si se desea modificar un único pin, es conveniente hacerlo con los siguientes registros *IOCLR* e *IOSET*.

- *IOCLR*: En la posición en la que se ponga un “1” en este registro de 32 bits, se obtiene a la salida un “0” (0 V).
- *IOSET*: En la posición en la que se ponga un “1” en este registro de 32 bits, se obtiene a la salida un “1” (3.3 V).

Con los pines de propósito general, se pretende controlar las señales que se muestran en la tabla 2.1. Estas señales se corresponden con señales significativas de control del esquema eléctrico, el cual se estudia en mayor detalle en el Apéndice B.

Señal	Pin	Función
GAIN0	P0.15	Bit menos significativo en la selección de la ganancia.
GAIN1	P0.16	Bit más significativo en la selección de la ganancia
_LDAC	P0.19	Entrada de sincronización para el convertidor MCP4922
_SHDN	P0.20	Habilitación hardware del convertidor MCP4922
LEDLAMP_ON/OFF	P0.21	Pin de activación de la fuente de corriente Wilson
HTC_LDD_ON/OFF	P0.22	Pin de encendido o apagado del MOSFET que provee de alimentación a los integrados LDD100-1P y HTC1500
MODE	P0.28	Bit que selecciona entre potencia constante y corriente constante, mediante la conmutación del relé

TABLA 2.1: Señales controladas por el puerto GPIO

2.2. Configuración de la UART

Tanto la *UART0* como la *UART1* responden al estándar industrial 16550. Por este motivo, pese a que el microcontrolador sea de 32 bits, ciertos registros de control de la

¹La dirección de los pines no solo se puede modificar al inicio del programa, sino en cualquier momento que se desee.

UART son de 8 bits, debido al intento de compatibilidad con UART's anteriores.

El acceso a los registros depende del valor del bit "DLAB". Cuando éste vale "0", se tiene acceso a los registros *RBR*, *THR*, *IER*. Cuando vale "1", se habilita el acceso al latch divisor *DLL* y *DLM*, útiles para fijar la velocidad de comunicación.

El bit *DLAB* se encuentra en el registro *LCR*, por lo que se configura dos veces, una para *DLAB*=0 y otra para *DLAB*=1.

Más aspectos sobre la UART se detallan en el Apéndice B, apartado B.4.1.

2.2.1. UART0 (PC)

La *UART0* es la encargada de establecer la comunicación con el ordenador. Por medio de este interfaz de comunicaciones, se establece la comunicación entre el programa del ordenador y el programa del microcontrolador. De esta manera, la información en dirección saliente del microcontrolador (hacia el PC) se escribe sobre la *UART0*. Del mismo modo, la información entrante al microcontrolador (desde el PC) se lee por la *UART0*.

Los parámetros de configuración para esta comunicación, se establecen atendiendo a las necesidades del programador, que es el único responsable de configurar la velocidad en ambos lados. Estos parámetros son los siguientes:

- Velocidad serie: 115200 baudios
- Sin bit de paridad
- Sin control Break

Para conseguir la velocidad de puerto serie, se debe respetar la siguiente ecuación 2.1:

$$UART_{n_{baudrate}} = \frac{PCLK}{16 \times (256 \times UnDLM + UnDLL) \times (1 + \frac{DivAddVal}{MulVal})} \quad (2.1)$$

Donde:

PCLK: Reloj de los periféricos

U0DLM y U0DLL: Registros de división de la *UART0*

DivAddVal y MulVal: Representan la fracción sobre la velocidad de transmisión

La frecuencia de oscilación del cristal de cuarzo es $FOSC = 14\,745\,600$ Hz. La configuración inicial del microcontrolador, está preparada para que el PLL multiplique x4 este valor. Así se consigue un reloj de periféricos de $PCLK = 14\,745\,600 \times 4 = 58\,982\,400$ Hz. Por último, de la ecuación 2.1, se puede obtener que el valor de división para los registros *DLL* y *DLM* para la *UART0* son los que siguen:

- $U0DLL = 32$
- $U0DLM = 0$

Con este valor de división $((256 \times UnDLM + UnDLL) = 32)$ se puede obtener una velocidad exacta² de: 115200 baudios.

$$UART_{baudrate} = \frac{14745600 \times 4}{16 \times 32} = 115200$$

Finalmente, la configuración de la UART0 en el programa del microcontrolador queda como se ve en el siguiente código 2.3:

```

1 //=====
2 // UART0
3 //=====
4 ///////////////////////////////////
5 //  UART0 INITIALIZATION
6 ///////////////////////////////////
7 void UART0_Init ()
8 {
9     U0LCR = 0x83; // 10000011 Line Control Register
10                //      .. Character length 11 = 8 bits
11                //      .   Stop bits          0 = 1 bit
12                //      .   Parity enable      0 = No parity
13                //      .   Even parity        non sense
14                //      .   Stick parity       non sense
15                //      .   Break control      0 = No break
16                //      .   DLAB                1 = Access DLM,DLL
17     U0DLL = 32;
18     U0DLM = 0; // Baud = 4*14745600/(16* 32) = 115200
19     U0LCR = 0x03; // Same a above, but DLAB = 0 = Normal access
20     U0FCR = 0x07; // 00000111 FIFO Control Register
21                //      . FIFO enable        1 = TX&RX FIFO on
22                //      . RX FIFO Reset      1 = Reset RX FIFO
23                //      . TX FIFO Reset      1 = Reset TX FIFO
24                //      .. RX int.t trigger level 00 = 1 byte
25 };
26 // -----

```

CÓDIGO 2.3: Código de configuración de la UART0

Antes de continuar con la programación de la *UART*, es importante tener en cuenta que el protocolo de comunicación que se sigue en un extremo de la comunicación, tiene que responder de igual manera en el otro. Con esto, hay que poner mucha atención en función del sistema operativo que se utilice. Debido a la diversidad de sistemas operativos diferentes, se dan multitud de errores la hora de programar este tipo de tareas. En el trabajo, se utiliza el sistema operativo *UBUNTU*.

A la hora de enviar un comando por el puerto serie y presionar *ENTER*, el sistema operativo se encarga de enviar el comando de nueva línea “\n”. Sin embargo, sistemas operativos como Windows, envían la sucesión de caracteres “\r\n” para la misma orden; siendo los caracteres de retorno de carro y nueva línea respectivamente. Por lo tanto, hay que ser prudente a la hora de elegir el carácter de final de línea que se envía. En este caso, a la hora de programar la comunicación con el ordenador, como éste trabaja bajo *LINUX*, solo hace falta enviar el carácter “\n”. De igual manera a la hora de leer, se lee hasta dicho carácter.

²Excepto por desviaciones propias del cristal de cuarzo

2.2.2. UART1 (Monocromador)

La *UART1* es la encargada de establecer la comunicación con el microcontrolador del monocromador. Para poder establecer la comunicación mediante esta interfaz, es necesario conocer los parámetros de comunicación con el microcontrolador del monocromador, así como las órdenes que hay que enviar para que éste opere de forma adecuada. Esta tarea de ingeniería inversa se desarrolló en las prácticas de empresa y se puede encontrar en detalle en el apartado [A.2.3](#).

Los parámetros de configuración para la comunicación con el monocromador son los siguientes:

- Velocidad serie: 9600 baudios
- Sin bit de paridad
- Sin control Break
- Sin control de flujo Hardware

Utilizando la ecuación [2.1](#), se puede obtener el valor de los registros *DLL* y *DLM* de la misma forma que se realizó para la *UART0*. Los valores para los registros en este caso son:

- $UIDLL = 128$
- $UIDLM = 1$

Con estos datos la ecuación corresponde con la velocidad necesaria exacta, 9600 baudios.

$$UART_{baudrate} = \frac{14745600 \times 4}{16 \times ((256 \times 1) + 128)} = 9600$$

La configuración de la *UART1* en el programa del microcontrolador queda como se aprecia en el siguiente código [2.4](#):

```

1 //=====
2 // UART1
3 //=====
4 //////////////////////////////////
5 //  UART1 INITIALIZATION
6 //////////////////////////////////
7 void UART1_Init ()
8 {
9     U1LCR = 0x83; // 10000011 Line Control Register
10                //      .. Character length 11 = 8 bits
11                //      .   Stop bits           0 = 1 bit
12                //      .   Parity enable       0 = Parity off
13                //      .   Even parity         0 = non sense
14                //      .   Stick parity        0 = non sense
15                //      .   Break control       0 = No break
16                //      .   DLAB                1 = Access DLM,DLL
17     UIDLL = 128;
18     UIDLM = 1; // Baud = 4*14745600/(16* 384) = 9600
19

```



```

20  U1LCR = 0x03; // Same as above, but DLAB = 0 = Normal access
21  U1FCR = 0x07; // 00000111 FIFO Control Register
22                //          . FIFO enable          1 = TX&RX FIFO on
23                //          . RX FIFO Reset        1 = Reset RX FIFO
24                //          . TX FIFO Reset        1 = Reset TX FIFO
25                //          . RX int. trigger level 00 = 1 byte
26  };
27  // -----

```

CÓDIGO 2.4: Código de configuración de la UART1

Como se ha comentado en el punto anterior referente a la configuración de la UART0, existen diversos problemas a la hora de comunicarse, si no se conoce exactamente el protocolo que sigue el otro dispositivo. El microcontrolador encargado del monocromador, se diseñó explícitamente para trabajar con un sistema operativo de Windows. Cuando el microcontrolador contesta a una orden, finaliza sus comunicaciones con los comandos “\r\n”. Sin embargo (en el sentido contrario), a la hora de enviarle órdenes al microcontrolador interno, éste solo acepta el comando “\r”. De esta forma, si por equivocación, se le envía “\r\n”, el microcontrolador responde a la orden hasta el “\r”, pero almacena en su buffer de entrada el “\n”. La siguiente orden que se le envíe será irreconocible para el monocromador, debido a que le precederá un “\n” y dará como respuesta un fallo en la orden.

Estos problemas de compatibilidad, obligan a que en la programación del microcontrolador (*LPC2103*), se programen adecuadamente los caracteres de fin de línea, dependiendo de si es lectura o escritura.

A continuación, en la Figura 2.3, se muestran los comandos enviados para realizar estas comunicaciones de forma correcta.

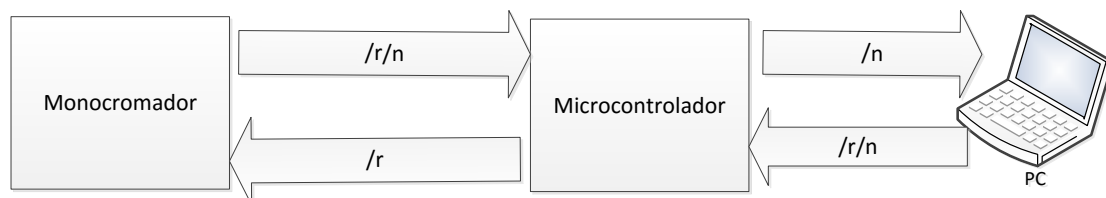


FIGURA 2.3: Esquema de los comandos de fin de línea

2.3. Configuración del periférico SPI

Los circuitos integrados *HTC1500* y *LDD1-100P* basan su control en la entrada de una señal analógica en uno de sus pines. Con el fin de tener la posibilidad de realizar caracterizaciones completas de diodos láser, se hace necesario incluir en el diseño un convertidor digital a analógico.

En el caso del proyecto, el control del convertidor se lleva a cabo mediante el protocolo de comunicación *SPI*. Protocolo elegido por razones de muy alta velocidad y simplicidad. Dentro de los periféricos que posee el microcontrolador, el periférico elegido en particular es el *SPI0*. Para poder controlar el periférico, hay que configurar los bancos

de registros correspondientes a esta interfaz.

Para comprender cómo se realiza la comunicación, hace falta conocer el protocolo *SPI*, detallado más a fondo en el apartado B.4.3; así como, conocer el flujo de datos que el convertidor espera recibir. Tanto esta información así como los cronogramas se pueden encontrar en las hojas de especificaciones técnicas del convertidor [6].

Las principales características del interfaz *SPI* del convertidor son, entre otras:

- Unidireccional. A pesar de implementar una comunicación *SPI* (*MOSI-MISO*), ésta es unidireccional en sentido al convertidor (esclavo). Los datos no se podrán leer del convertidor, solo escribir
- En el convertidor los datos se leen en el flanco positivo de la señal de reloj (rising edge)
- El comando de escritura se compone de 16 bit, en los que se encuentran los datos de información, los datos de control del convertidor y la información para los cerrojos
- Frecuencia de funcionamiento 1 MHz

2.3.1. Comando de escritura

El establecimiento de la comunicación, se espera mediante una palabra de 16 bits. Cualquier ciclo de reloj después del ciclo 16, será ignorado por el convertidor.

La comunicación comienza con la transición $1 \rightarrow 0$ de la señal \overline{CS} . Después, le siguen los cuatro bits de datos de control y los doce bits de datos de información. Una vez enviados los datos, se levanta la línea de \overline{CS} ($0 \rightarrow 1$), para que los datos pasen al registro del correspondiente convertidor.

El convertidor tiene una salida dual controlada por la señal \overline{LDAC} . Cuando esta señal se pone en nivel bajo, los registros de entrada se transfieren a los registros de salida. La salida entonces, adquiere el valor de conversión.

Si se detecta un flanco de subida de la señal \overline{CS} antes de que se complete la transferencia, se cancela dicha transferencia de los registros de desplazamiento.

En la Figura 2.4 se puede ver el formato de las tramas enviadas entre el microcontrolador y el convertidor *DAC*. Se puede ver cómo los cuatro primeros bits son los bits de control, y los doce siguientes corresponden con los datos.

REGISTER 5-1: WRITE COMMAND REGISTER FOR MCP4922 (12-BIT DAC)

W-x	W-x	W-x	W-0	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x
$\overline{A/B}$	BUF	GA	\overline{SHDN}	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
bit 15								bit 0							

FIGURA 2.4: Comando de escritura del convertidor digital a analógico

Donde en la Figura 2.4, los siguientes bits representan:

bit 15 $\overline{A/B}$: Selección del DAC_A ó DAC_B

- 1 = Escribir en DAC_B
- 0 = Escribir en DAC_A

bit 14 BUF : Bit de control del buffer de entrada V_{REF}

- 1 = Con buffer
- 0 = Sin buffer

bit 13 \overline{GA} : Bit de selección de la ganancia de salida

- 1 = $1 \times (V_{OUT} = V_{REF} * D/4096)$
- 0 = $2 \times (V_{OUT} = 2 * V_{REF} * D/4096)$ ³

bit 12 \overline{SHDN} : Bit de control de apagado de la salida

- 1 = Operación en modo activo. V_{OUT} activo
- 0 = Apaga el canal seleccionado. La salida analógica del convertidor V_{OUT} se conecta a una resistencia, típicamente de 500 k Ω

bit 11-0 $D11 : D0$: Bits de datos de entrada al convertidor

Finalmente, las transiciones que se tienen que llevar a cabo mediante el protocolo *SPI*, son las que se pueden ver representadas en el cronograma de la Figura 2.5

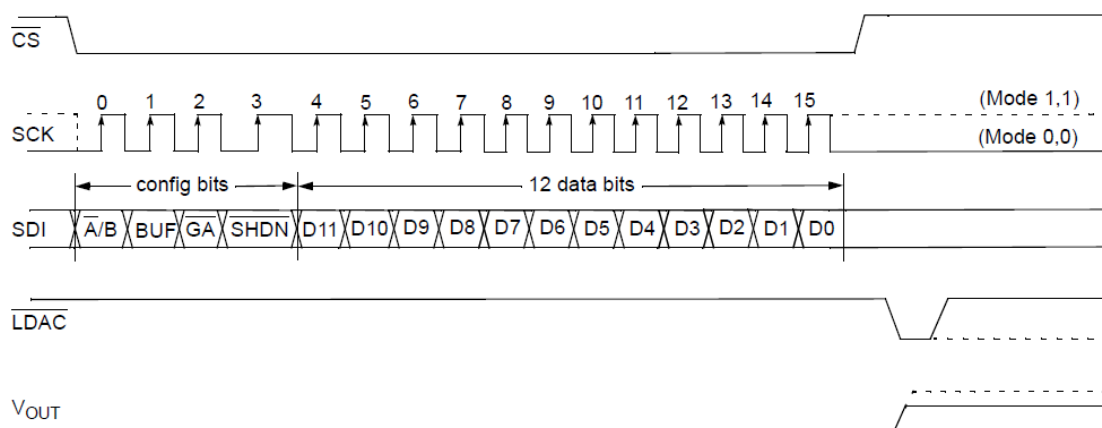


FIGURA 2.5: Secuenciación de las tramas *SPI* para el convertidor

2.3.2. Registros SPI

La escritura de los bancos de registros del microcontrolador, debe respetar los cronogramas citados con anterioridad, para que el funcionamiento del protocolo sea el esperado y el convertidor entienda la comunicación.

Otro de los aspectos que se debe respetar, es el esquema eléctrico. Éste, determina

³ V_{REF} conectado a 5 V

inequívocamente, que el canal A corresponda con el control de la temperatura (señal *TEMP_IMPUT*) y que el canal B corresponda con el control de la corriente/potencia, suministrada al diodo láser (señal *MODIMPUT*). De esta forma, cuando se quiera controlar la temperatura, el bit más significativo de la trama conformada tiene que ser un “0”. Al contrario, cuando se quiera controlar la corriente/potencia del láser, el bit más significativo tiene que ser un “1”.

Otro de los parámetros a tener en cuenta antes de empezar a programar los registros, es que el convertidor elegido tiene un control de ganancia interno. Debido a que el pin V_{REF} se ha conectado a 5 V, la selección de ganancia correcta para el caso del trabajo es de ganancia x1. Este motivo se debe a que el convertidor se seleccionó para ser capaz de ofrecer a su salida voltajes entre 0 V y 5 V. Otra posibilidad hubiese sido al asignar el pin V_{REF} a 2.5 V y seleccionar una ganancia de x2. En este hipotético caso, la elección hubiese sido incorrecta, debido a que en el circuito no existen tensiones de referencia estables de 2.5 V. Por lo tanto, la conexión más adecuada es de 5 V.

Una vez vistos los requisitos que tiene que cumplir la comunicación, los registros a configurar del *LPC2103* son los siguientes:

- **S0SPCR:** Es el registro de control de la operación *SPI* y es el más importante en la configuración del *SPI*. En él, se definen los siguientes bits:
 - **BitEnable:** Bit a 1 para habilitar la transmisión de más de 8 bits
 - **CPHA:** Bit a 0 para que el muestreo se realice en el primer flanco de reloj
 - **CPOL:** Bit a 0 para que el muestreo se realice en el nivel alto de la señal de reloj
 - **MSTR:** Bit a 1 para definir el microcontrolador como maestro, y no como esclavo
 - **LSBF:** Bit a 0 para definir que la transmisión empiece con el bit más significativo
 - **SPIE:** Bit a 0 para deshabilitar las interrupciones del *SPI*
 - **BITS 11:8:** 4 bits con valor “0000” para definir unas transiciones de 16 bits
- **S0SPCCR:** Es el registro encargado de definir la velocidad de transmisión. Equivale a un registro de ocho bits encargado de dividir por su valor al reloj de los periféricos *PCLK*. La ecuación que corresponde con esta división se puede ver en la Ecuación 2.2. Con intención de obtener una velocidad de 1 MHz, el resultado para el valor del registro *S0SPCCR* es de 58.98; por lo que utilizando el valor entero de 59 para el registro, se obtiene una velocidad final de 999 701 Hz.

$$F_{sck} = \frac{PCLK}{S0SPCCR} = \frac{14745600 \times 4}{S0SPCCR} \quad (2.2)$$

- **S0SPDR:** Es el registro encargado de transmitir y recibir los datos. En este caso la comunicación es unidireccional, por lo que el registro de desplazamiento de entrada de datos contendrá únicamente datos “tontos” (*dummy bits*).

La configuración del *SPI* dentro del programa del microcontrolador se puede ver en el siguiente código 2.5:

```

1 //////////////////////////////////////////////////
2 //  SPI
3 //////////////////////////////////////////////////
4 void SPI_Init ()
5 {
6     S0SPCCR = 0x0024;           //000000100100 Control Reg.
7                                 //      .. Reserved
8                                 //      .   BitEnable      1 = >8 bit
9                                 //      .   CPHA = 0   First clock edged
10                                //      .   CPOL = 0   sck high
11                                //      .   MSTR = 1 Master
12                                //      .   LSBF = 0 MSB first
13                                //      .   SPIE = 0 INT disabled
14                                //.....   BITS      Transfer length (0000=16)
15
16     S0SPCCR = 59;               // 8-bit clock frequency divider
17                                //Fsck=PCLK/S0SPCCR=1MHz --> S0SPCCR=4*14745600/1e6
18                                //                    =58.98=59
19                                //Fsck = 14745600*4/59=999701 aprox 1MHz
20 }

```

CÓDIGO 2.5: Configuración de los registros del SPI para su óptimo funcionamiento

2.4. Funcionamiento del microcontrolador. Diagramas de flujo

En este capítulo se trata de explicar, en la medida de lo posible, el flujo que sigue el programa del microcontrolador.

Como regla general, hay que evitar perder el flujo del programa. Como se ha mencionado anteriormente, se debe implementar un bucle “infinito”. De esta forma, el flujo del programa tiene que acabar en el mismo punto en el que se inicia. Por este motivo, todas las funciones acaban alcanzando el estado *IDLE* (estado ocioso de espera al siguiente comando).

Para obtener un control de flujo adecuado, todas las funciones han de terminar enviando al ordenador su estado. En el caso de que todo haya ido de forma correcta, el código enviado al ordenador es “AOK” (*All OK*). Si en algún momento de ejecución del programa se obtiene un estado inesperado, el microcontrolador es el encargado de notificarlo al ordenador. Esta notificación de error se realiza mediante el envío del código “NOK” (*Not OK*). Tanto si el ordenador recibe un código “NOK” como si el tiempo de espera a una función excede el tiempo máximo permitido, el ordenador debe despreciar el análisis realizado; además de pedir su retransmisión.

Como mecanismo de control de errores interno al microcontrolador, el valor de retorno de las funciones que implementan un correcto funcionamiento ha de ser de “0”. Cualquier valor de retorno distinto de “0”, implica un fallo a la hora de la realización de la función. Por el momento, solo se puede saber si el funcionamiento ha sido correcto o no. Más adelante, con un código de errores de retorno, se puede mejorar la

robustez del programa e incluir mecanismos de corrección de errores, como retransmisiones o notificaciones al usuario.

Para cualquier tipo de error en la realización de un escaneo, el encargado de pedir la repetición del análisis ha de ser el software controlador del ordenador. Éste, si detecta un análisis problemático por cualquier motivo (ruido, pérdida de datos, etc), debe despreciar los datos recibidos y volver a solicitar el análisis correspondiente.

2.4.1. Función main

La función main sigue el diagrama de flujo de la Figura 2.6.

La función main, como su propio nombre indica, se corresponde con la función principal del programa del microcontrolador. Es la primera función que se ejecuta. En ella se inicializan los periféricos y se entra en el bucle principal.

El bucle principal se representa como un bucle infinito, ya que es deseable que el programa interno, funcione de forma continuada.

Una vez en el bucle principal, esta función realiza funcionalidad mínima y solo se encarga de repartir el flujo entre otras subfunciones.

La forma en la que se han definido los códigos para llamar a las subfunciones, ha seguido un orden lógico atendiendo a la función que desempeñan. Por esta misma razón, se ha elegido un código de cinco caracteres para definir cada comando. En un principio, se define que los comandos válidos para controlar diodos LED, empezasen por “LED”. Por el otro lado, los dedicados a diodos láser empiezan por “LD”. Los comandos que no tienen como destino directo el análisis de diodos LED o láser, tienen sus propios nombres.

Una vez diferenciado el destino de aplicación, quedan dos caracteres libres para los LED y tres para los láser. Con los caracteres libres se han configurado los comandos que se detallan a continuación.

2.4.1.1. Comandos para el monocromador

Los comandos que recogen el funcionamiento del monocromador, son los que no dependen de la utilización de una fuente emisora de luz. No sirven para el análisis y solo describen funciones propias del monocromador.

CONN, CONNECTION TO MONOCHROMATOR: Cuando se envía este comando al microcontrolador, éste se encarga de comprobar si el monocromador se encuentra conectado correctamente.

RESET: Función implementada por la necesidad de resetear el monocromador. Es posible que se de la necesidad de un reset, cuando tras varios intentos de enviar una orden, el monocromador no responda

En la Figura 2.6 se puede ver el diagrama de flujo que implementa la función principal cuando bifurca el flujo hacia las funciones correspondientes al monocromador.

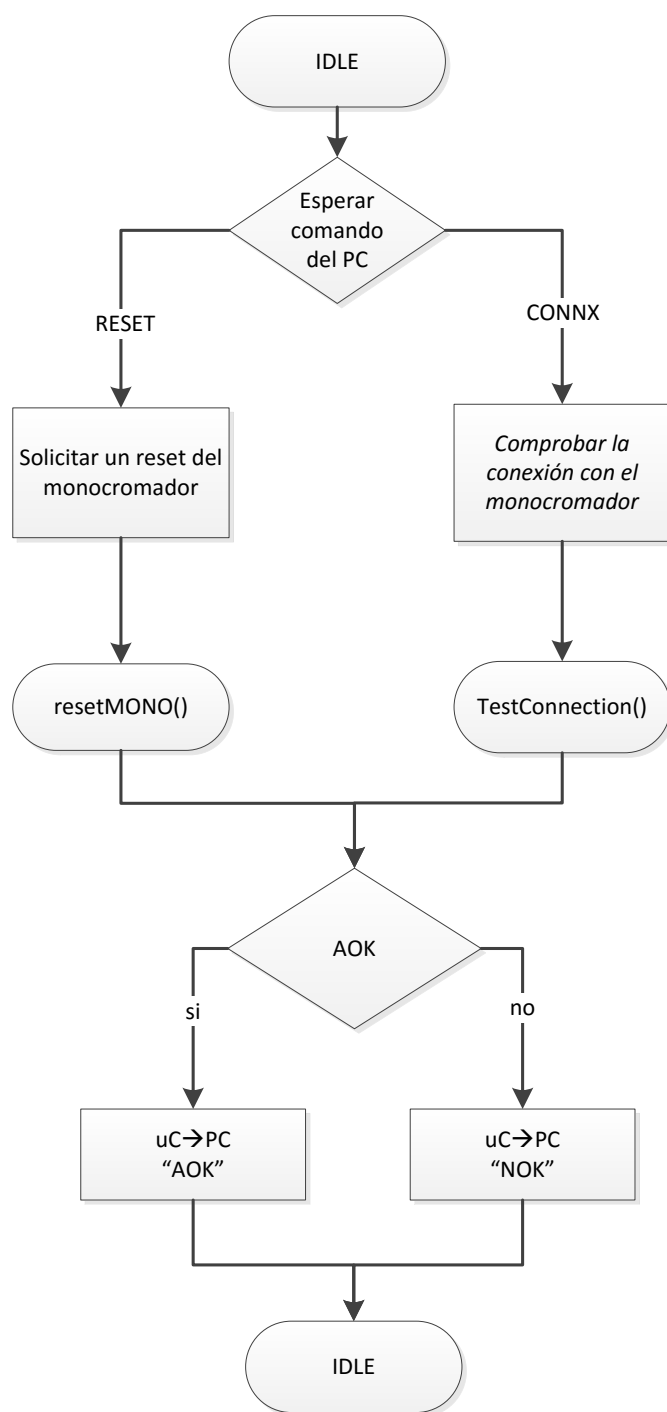


FIGURA 2.6: Diagrama de flujo principal. Sección de control del monocromador

2.4.1.2. Comandos para LED

LEDSC, LED SCAN: Comando para realizar un escaneo espectral de un diodo LED. Precisa de cuatro parámetros:

1. Longitud de onda inicial (mínimo 350 nm)⁴
2. Longitud de onda final (máximo 1080 nm)⁴
3. Sensibilidad (mínimo 0.01 nm)
4. Ganancia para el amplificador de entrada

LEDON, LED ON: Comando utilizado para encender la fuente de corriente Wilson y suministrar corriente al diodo LED. Es utilizado, por ejemplo, a la hora de medir la tensión de operación del diodo LED (V_F).

LEDOF, LED OFF: Comando utilizado para apagar la fuente de corriente Wilson y por lo tanto el diodo LED. Siempre que no se utiliza, conviene apagar el LED para ahorrar energía, evitar que se caliente y por consiguiente, produzca medidas erróneas.

LEDGT, Go To: Comando para ordenar al monocromador que vaya a una longitud de onda concreta. Inicialmente esta función estaba implementada para LED; no obstante, se reutiliza el código para diodos láser ya que la funcionalidad es la misma en ambos casos.

LEDTR, LED TERMINAL: Comando para establecer el modo terminal con el monocromador. De igual manera que el anterior (*LEDGT*) se ha implementado para LED, pero puede ser utilizado con cualquier tipo de fuente. Pese a todo, solo se ha incluido en el menú de control de LEDs del ordenador; por lo que en principio, no se utilizará para otro.

LEDTE, LED TERMINAL END: Comando utilizado para cuando se desee cerrar la conexión de modo terminal.

En la Figura 2.7 se puede ver el diagrama de flujo que implementa las funciones correspondientes al control y análisis de los diodos LED, o en general, las funciones de obtención del espectro de emisión de cualquier fuente emisora de luz.

⁴Tanto el mínimo como el máximo están limitados por el rango de responsividad del fotodiodo utilizado

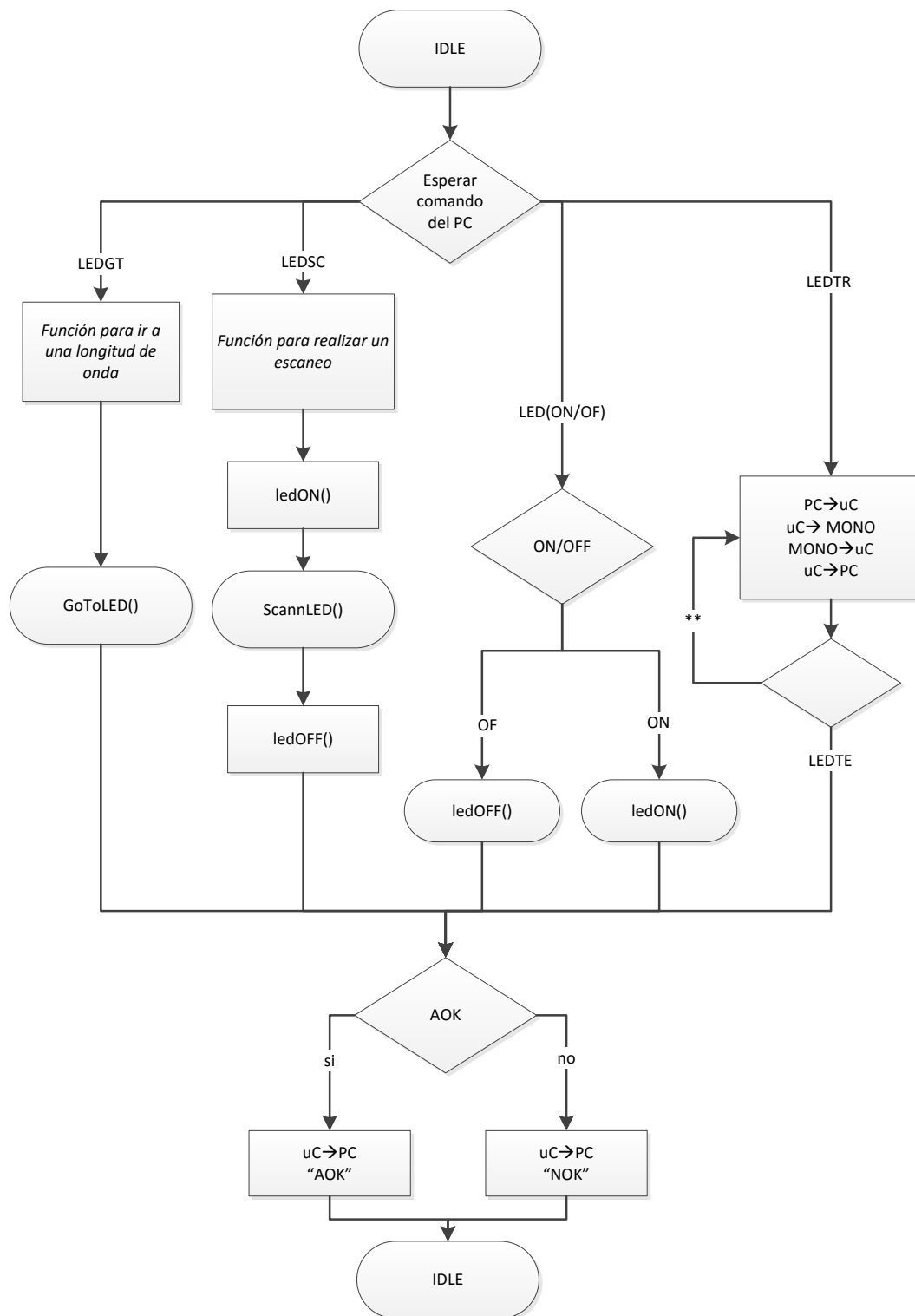
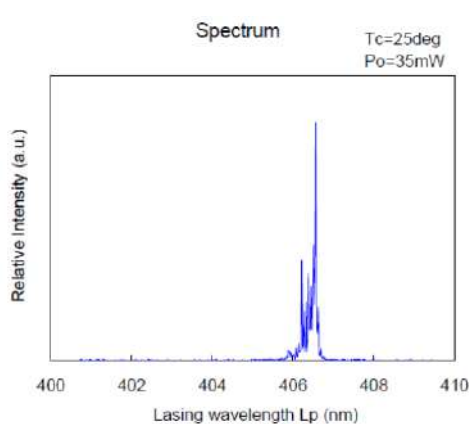


FIGURA 2.7: Diagrama de flujo principal. Sección de control de LED's

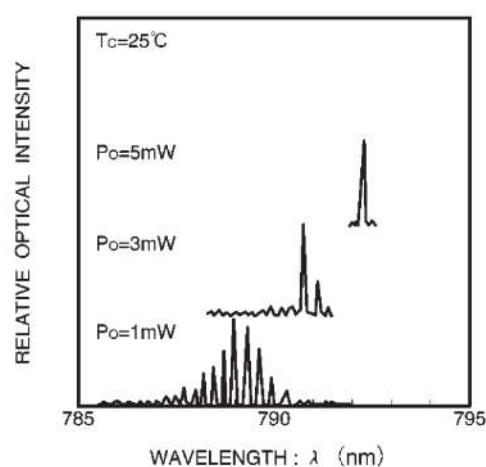
2.4.1.3. Comandos para láser

LDSSC, LASER DIODE SPECTRAL SCANN: Comando utilizado para realizar barridos en longitud de onda y obtener una caracterización espectral del diodo láser. Se pueden dar tres tipos de análisis espectrales:

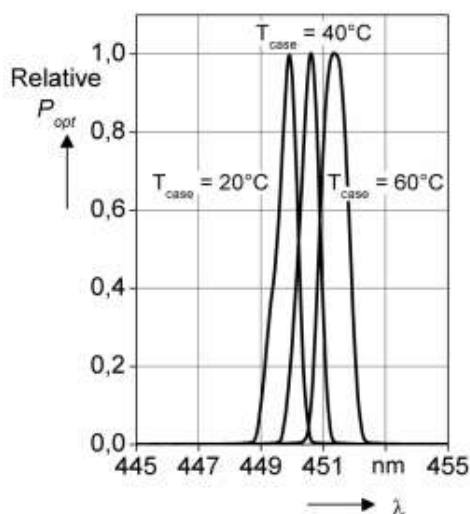
1. Análisis a potencia constante y a temperatura constante (una curva como la de la Figura 2.8a)
2. Análisis a temperatura constante (varias curvas para ver la dispersión. Correspondiente con la Figura 2.8b)
3. Análisis a potencia constante (varias curvas para ver la dispersión. Correspondiente con la Figura 2.8c)



(A) Respuesta espectral del láser DL-5146-152 de SANYO



(B) Respuesta espectral a distintas potencias del LD RLD-78MIT

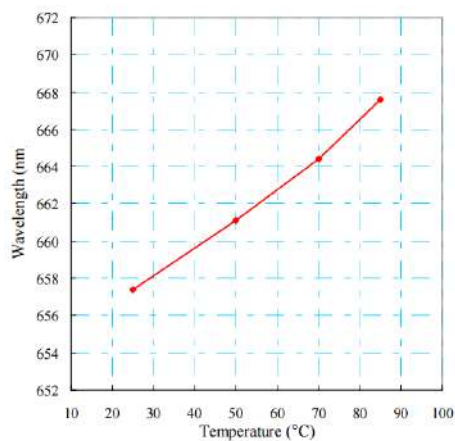


(C) Respuesta espectral a distintas temperaturas del LD OSRAM PL 450B

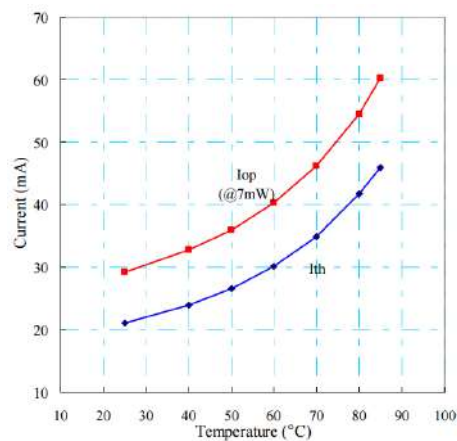
FIGURA 2.8: Tipos de análisis espectrales

LDTSC, LASER DIODE TEMPERATURE SCANN: Comando utilizado para realizar una caracterización de la emisión dependiendo de la temperatura⁵. Este tipo de análisis se consigue de la composición (repetición) del tercer tipo de análisis espectral para varias temperaturas.

Fijando una potencia óptica de emisión, se realizan análisis espectrales a diferentes temperaturas. Con esto se consigue conocer la longitud de onda en la que la emisión del láser es máxima. Con este tipo de análisis se pueden caracterizar curvas como las de las figuras 2.9a y 2.9b.



(A) Pico de emisión



(B) Corriente de operación

FIGURA 2.9: Análisis térmicos para el ADL-65074TR/L de AlGaInP

LDPS, LASER DIODE POWER SCANN: Comando enviado para realizar una caracterización del diodo láser en un barrido de potencia (para una temperatura de encapsulado (T_c) fija⁵). Con esta función se puede caracterizar la curva de **Potencia VS Corriente** a cada temperatura de encapsulado. Este tipo de análisis se puede ver en la Figura 2.10 y se consigue de la composición (repetición) del segundo tipo de análisis espectral para varias potencias.

⁵**Cuidado:** no confundir los términos. En el análisis térmico la variable es la temperatura y en el análisis de potencia la variable es la potencia óptica de emisión

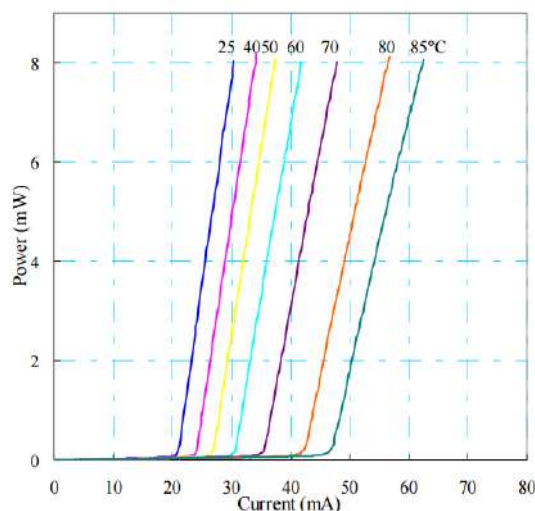


FIGURA 2.10: Potencia óptica frente a corriente para cada temperatura

Parámetros para diodos láser: Dependiendo del tipo de análisis que se escoja harán falta unos u otros, pero en general son los siguientes:

1. Control de la longitud de onda
 - Longitud de onda inicial
 - Longitud de onda final
 - Sensibilidad para el monocromador
2. Control de la temperatura
 - Temperatura fija
 - Temperatura inicial ⁶
 - Temperatura final ⁶
 - Sensibilidad de temperatura (mínimo incremento)⁶
3. Control de potencia
 - Potencia fija
 - Potencia inicial ⁷
 - Potencia final ⁷
 - Sensibilidad de potencia (mínimo incremento)⁷

En la Figura 2.11 se puede ver el diagrama de flujo que implementan las funciones correspondientes al control y análisis de los diodos láser. En él, se incluye una caja provisional con el código "LD***", para las posibles implementaciones futuras de la funcionalidad.

⁶Solo para funciones con barrido en temperatura

⁷Solo para funciones con barrido en potencia

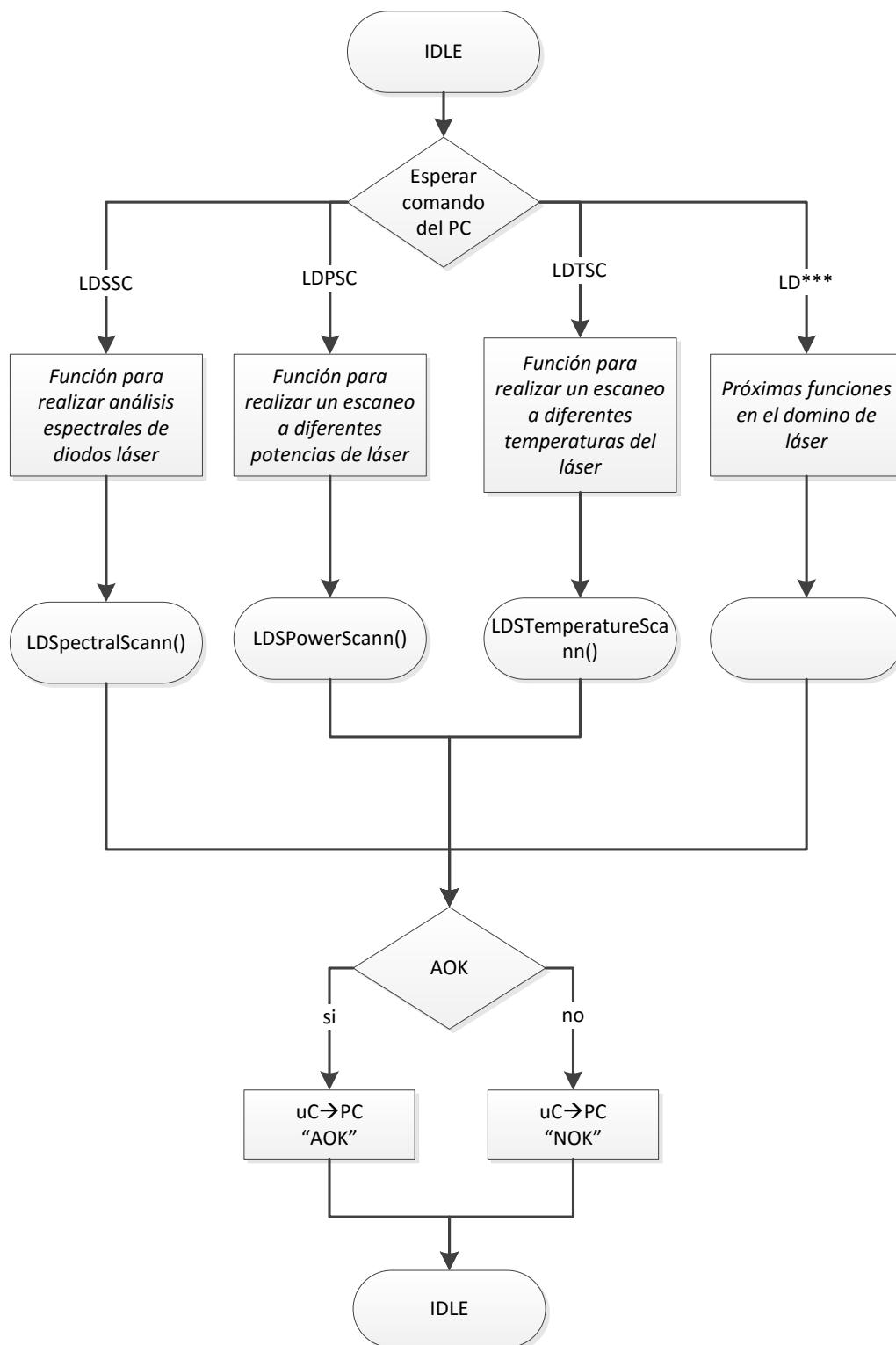


FIGURA 2.11: Diagrama de flujo principal. Sección de control de láser

2.4.2. Función CONNX

El diagrama de flujo de la comprobación de conexión sigue el mismo esquema que el analizado por medio de ingeniería inversa del programa original. Esta conexión se puede ver en el apartado de ingeniería inversa del Apéndice A en el código A.1. En la Figura 2.12 se puede ver el diagrama mencionado. En él, se observa que cada vez que se realiza una petición al monocromador, éste contesta con los datos correspondientes. Estos datos son útiles a la hora de obtener la información del monocromador. En ellos se pueden observar datos significativos como el modelo del equipo, las opciones que tiene disponibles; así como información relativa a las rejillas y torres instaladas. Por otro lado, toda esta información se puede obtener individualmente por medio de comandos en el modo terminal, pero el software original realiza estas operaciones y se han dejado tal y como se hace en él.

La información recibida por parte del monocromador se puede almacenar y, posteriormente, ser tratada para incrementar la información sobre el equipo a la hora de realizar un análisis. Por ejemplo, para editar una cabecera en los análisis con el modelo y/o número de serie del monocromador.

Por ahora la única funcionalidad que desempeña la función CONNX, es la de comprobar que el monocromador se encuentra conectado. Como se ha comentado anteriormente, si el valor de retorno de esta función es un "0", significa que todo ha ido bien. En caso contrario, es conveniente realizar algún tipo de comprobación del error, ya que puede haber un error durante la conexión o una simple pérdida de datos.

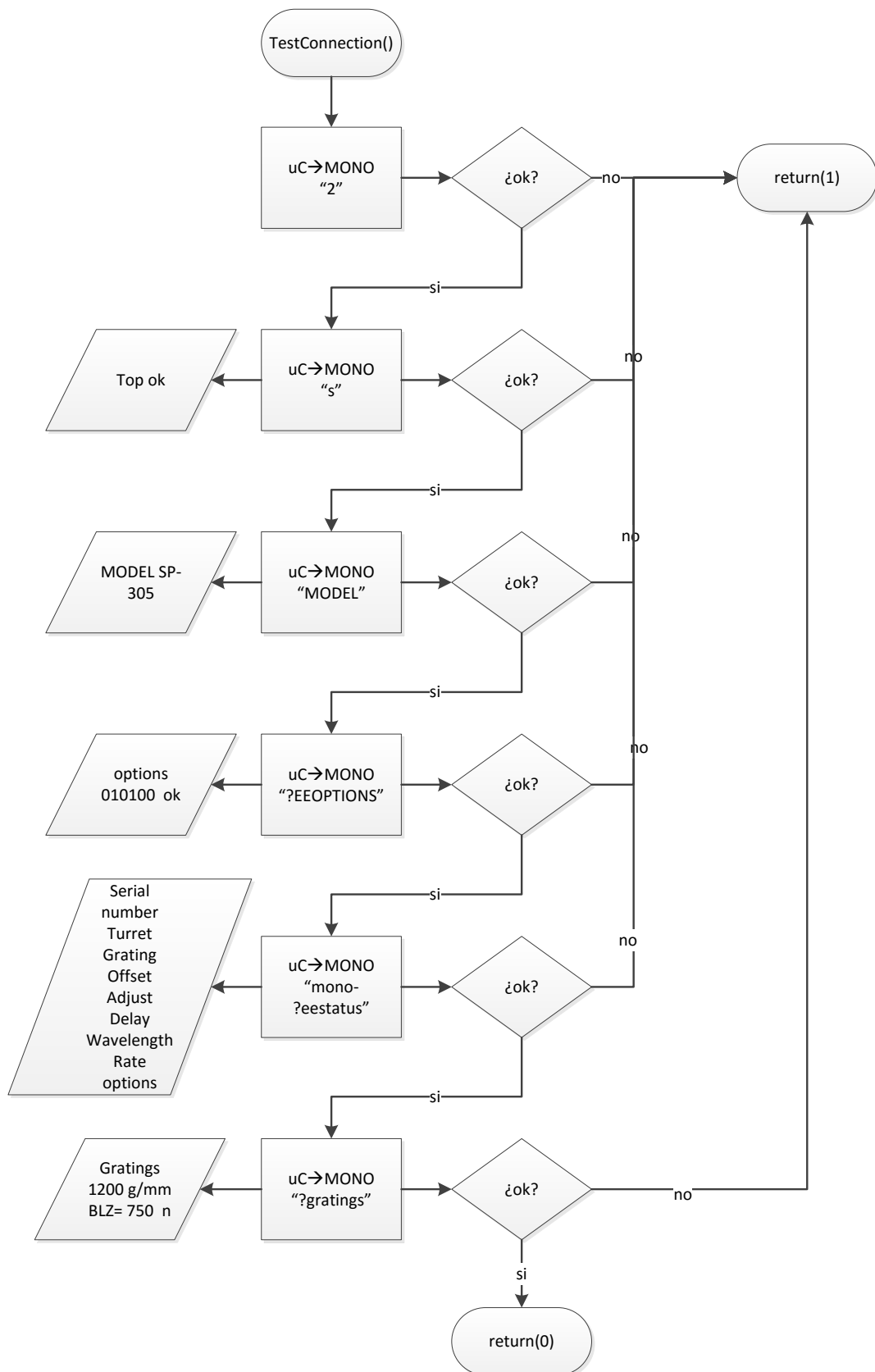


FIGURA 2.12: Diagrama de flujo de la comprobación de conexión con el monocromador

2.4.3. Función LEDGT

La función de enviar al monocromador a una longitud de onda, es una de las funciones más útiles para el trabajo. Siempre y cuando se necesite mover el monocromador a una determinada longitud de onda, se llamará a esta función desde otras funciones. Esta función solo necesita, como parámetro de entrada, la longitud de onda a la que se quiere enviar al monocromador. Esta longitud de onda tiene que ser enviada como una cadena de siete caracteres entre los que figuran:

- Cuatro caracteres correspondientes con los cuatro dígitos de la parte entera de la longitud de onda destino, en nm
- Un carácter intermedio correspondiente con el punto decimal que separa la parte entera de la parte decimal
- Dos caracteres correspondientes con la parte decimal de la longitud de onda. Son dos dígitos debido a la resolución máxima del monocromador, que es 0.01 nm

Una vez recibidos los parámetros, la función tiene que formar la cadena de control, que espera recibir el monocromador para enviarlo a una longitud de onda⁸. Una vez se tiene la cadena de longitud de onda + ">goto", se envía la misma al monocromador esperando su respuesta. El monocromador confirma la respuesta con la misma cadena que se le envió, concatenando la palabra "ok" al final. Una vez confirmada la orden, se considera que el monocromador está moviendo la rejilla para obtener la correspondiente longitud de onda. Dado que el movimiento no es instantáneo, se le envían los comandos "?nm" y "mono-?done" para controlar el proceso. El monocromador responde a "?nm" con la longitud de onda en la que se encuentra en ese instante. Después, contesta a "mono-?done" confirmando o negando si ha terminado con el movimiento de la rejilla. Gracias a estos dos comandos, se puede establecer un seguimiento del proceso del monocromador. Así, en todo momento, se puede conocer la longitud de onda por la que éste se encuentra y si el movimiento ha finalizado.

Una vez en la longitud de onda destino, si se envía la orden "?nm", se debe obtener precisamente la longitud de onda del destino. Después, para verificar que el monocromador ha llegado a su destino, el comando "mono-?done" debe responder con un "mono-?done 1 ok".

Si todo se ha realizado de forma correcta, como última orden se le envía al monocromador el comando "MONO-STOP", con el que se detiene monocromador y se queda esperando la siguiente orden.

Si el proceso de movimiento del monocromador se ha realizado correctamente, la función encargada del movimiento del mismo (LEDGT), devolverá un "0" como valor de correcto funcionamiento. En caso contrario, se enviará un "1" para marcar que se ha dado un error y que la función principal se encargue de enviar el correspondiente comando de error "NOK" al software controlador.

Como se puede ver en la Figura 2.13, se implementa algo parecido a un perro guardián, pero en este caso no se implementa por medio de temporizadores sino por medio de retransmisiones. De este modo, si el número de retransmisiones que intenta cada comando excede los veinte segundos, el perro guardián cancela la operación y detiene el

⁸Los comandos para manejar el monocromador se estudian en detalle en el apartado de comandos de la ingeniería inversa realizada sobre el monocromador, A.2.4

monocromador. En este caso, la función devuelve un “return(1)” como código de error. El tiempo del perro guardián corresponde con veinte segundos debido a que se intenta una retransmisión cada segundo, para dar tiempo así al monocromador a llegar a la correspondiente longitud de onda. Es tiempo más que suficiente para realizar el barrido completo de todo su rango espectral, por lo que tiempos superiores indican errores de funcionamiento.

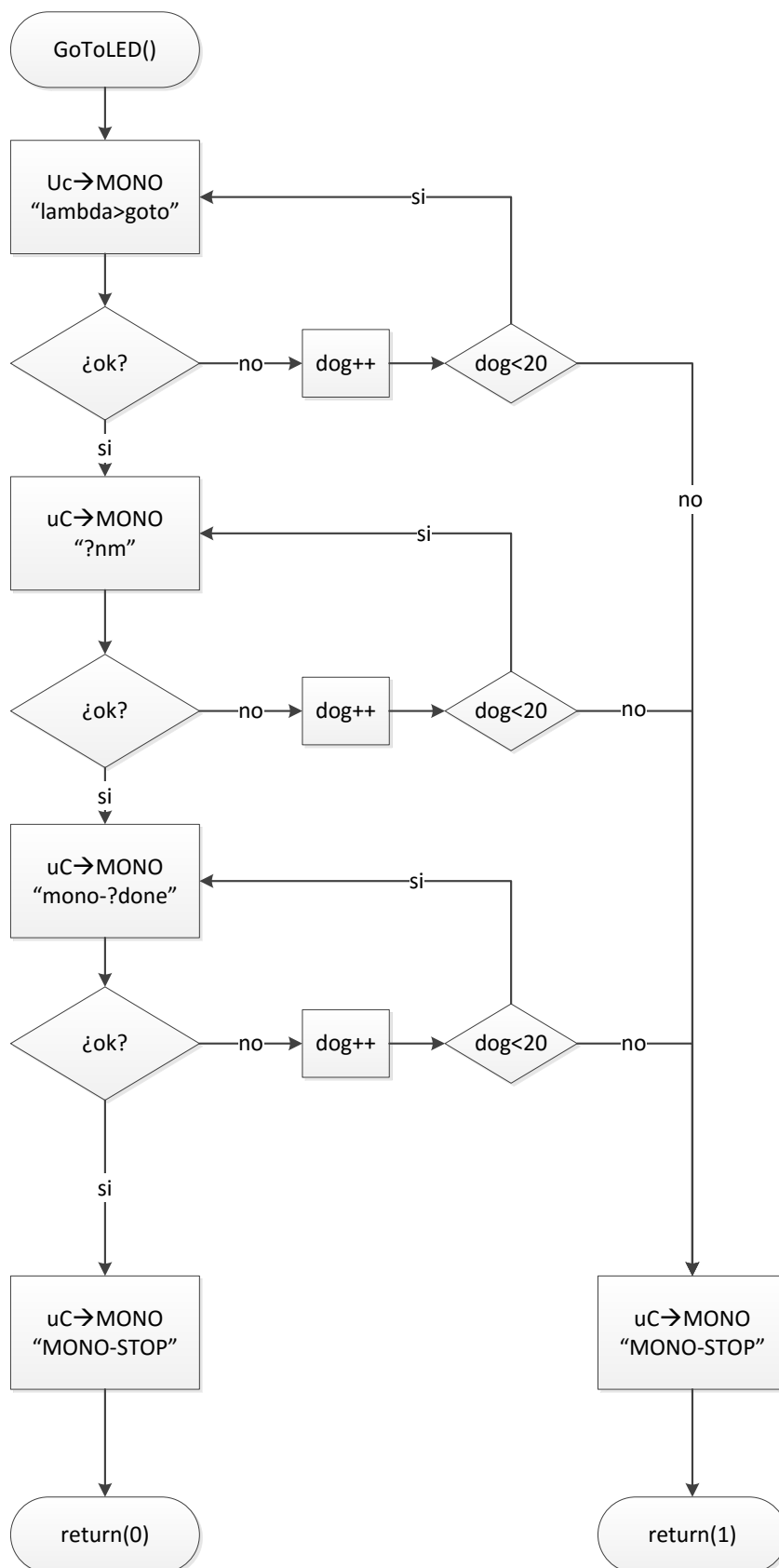


FIGURA 2.13: Diagrama de flujo del comando encargado de enviar al monocromador a una longitud de onda

2.4.4. Función LEDSC

La función *LEDSC*, es la función encargada de realizar un análisis espectral de la fuente emisora de luz que se sitúa a la entrada del monocromador. Esta función se implementa por primera vez a la hora de analizar los diodos LED. No obstante, posteriormente se volverá a utilizar para las funciones de análisis espectral de diodos láser. Cualquier función dentro del programa del microcontrolador puede llamar a esta función para realizar un análisis espectral. Necesita, como parámetros de entrada los siguientes:

- Longitud de onda inicial del escaneo
- Longitud de onda final que se quiere alcanzar
- Resolución enviada como la sensibilidad de cada paso
- Ganancia para el amplificador interno

Estos parámetros se envían en forma de cadena. Cada uno de ellos tiene correspondencia directa con la cadena que se envía desde el ordenador. Esto indica, que sólo es necesario cortar los parámetros de la cadena que se recibe del ordenador y enviárselos a la función.

El funcionamiento interno del comando LEDSC se lleva a cabo de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. La función se encarga de fijar la ganancia apropiada para el sistema de acondicionamiento de entrada. Debido a que se tienen dos sistemas de acondicionamiento de entrada, uno externo y uno interno, el único que se fija es el interno. En caso contrario, si el elegido es el externo, la ganancia interna es insignificante ya que los datos entran al convertidor por otro camino⁹.
2. Una vez que el multiplexor ha seleccionado la ganancia correcta, se envía al monocromador a la longitud de onda inicial del escaneo. Para ello se utiliza la función "GoToLED" para ir a una longitud de onda concreta.
3. Si se ha llegado a la longitud de onda correcta (GoToLED ha devuelto un 1), el siguiente paso es medir la entrada del convertidor analógico a digital. Para ello, se llama a la función encargada de realizar dicha conversión. Esta función requiere la entrada de dos parámetros; el primero es el canal que se quiere convertir y el segundo es el número de muestras que se desean adquirir. Es necesario enviar estos dos parámetros si se quiere reutilizar dicha función en el futuro para medir la tensión en otros puntos. Los canales que se pueden utilizar se encuentran descritos en el Apéndice B en el punto B.4.2.
4. Una vez que el convertidor ADC obtiene el valor de la medida, esta se envía al ordenador para su posterior procesado. Además, se envía al ordenador la longitud de onda a la que corresponde la medida, de tal forma que se envíen la longitud de onda y la medida en la misma cadena de datos.

⁹Ambos caminos se pueden ver en el apartado correspondiente del esquema eléctrico, en particular el apartado de acondicionamiento de entrada, B.10

5. Tras enviar los datos el microcontrolador espera la señal de confirmación del ordenador, que indica que los datos han sido correctamente recibidos. Una vez que el microcontrolador recibe el "ACK", se continúa el programa.
6. El siguiente paso es incrementar la longitud de onda actual. El aumento de esta longitud de onda depende de la sensibilidad que se envió como parámetro a esta función. Como resultado, se obtiene que la longitud de onda siguiente es igual a la longitud de onda actual más la sensibilidad.
7. Si no se ha alcanzado la longitud de onda final, se repite el proceso desde el punto 1. Si por el contrario se ha alcanzado la longitud de onda final, se vuelve a la función principal devolviendo un "0" como procedimiento correcto.

En la Figura 2.14 se puede observar el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento explicado anteriormente. Como se puede apreciar, el bucle se repite las veces necesarias como para completar el rango solicitado de longitudes de onda.

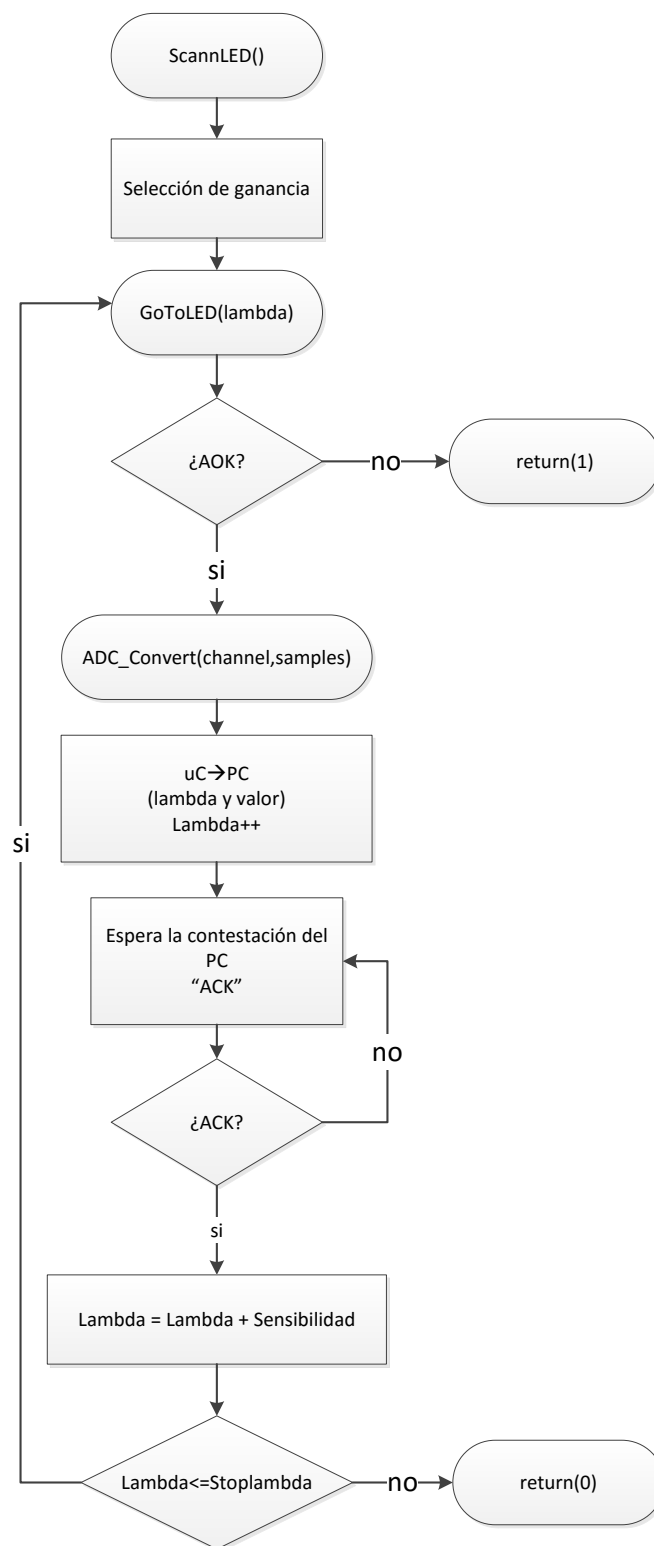


FIGURA 2.14: Diagrama de flujo de la función encargada de realizar el análisis espectral

2.4.5. Función LEDTR

Otra de las funciones que merece la pena detallar es la de modo terminal. Por medio de esta función, desde el controlador del ordenador, se puede establecer una comunicación directa con el monocromador. Con esta función, el microcontrolador únicamente reenvía lo que recibe del ordenador por el puerto serie del monocromador. Del mismo modo, realiza la misma función en sentido contrario para enviar los datos desde el monocromador al ordenador.

La funcionalidad de este comando es muy reducida pero su utilidad puede ser de gran valor. Siempre que se necesite realizar una acción sobre el monocromador, y no se disponga de un comando directo, se puede realizar mediante el modo terminal. De este modo, si por ejemplo se desea preguntar el número de serie al monocromador, se podría establecer el modo terminal y entonces enviar la palabra de control: *"SERIAL"*. El diagrama de flujo correspondiente a esta función se puede ver en la Figura 2.15.

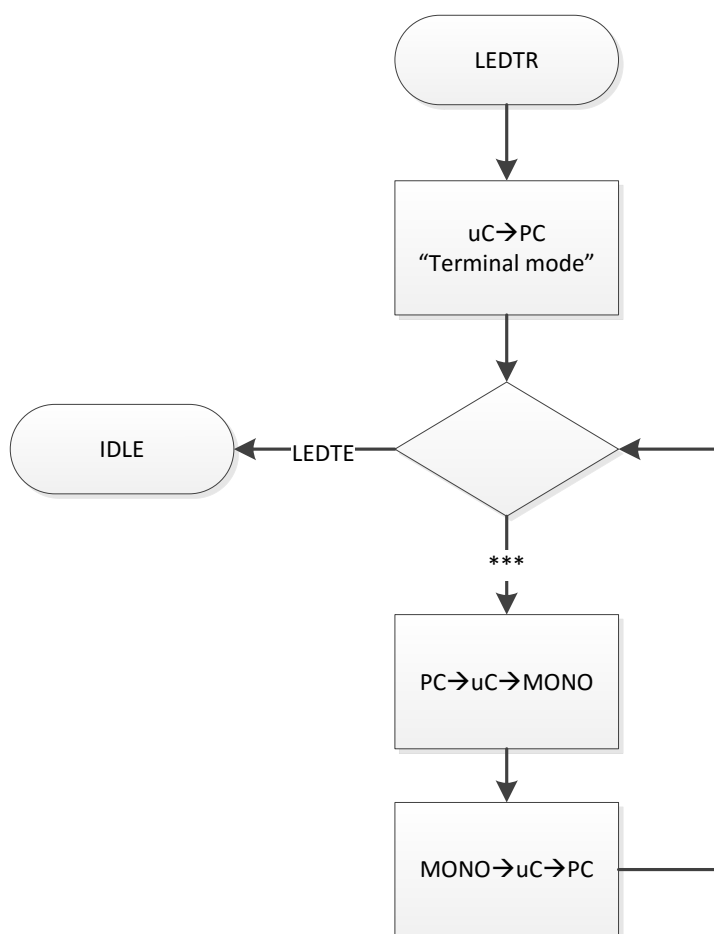


FIGURA 2.15: Diagrama de flujo de la función terminal

Capítulo 3

Programación del PC

El control del analizador de diodos láser del proyecto se lleva a cabo mediante un programa de ordenador, anteriormente mencionado como software controlador. Uno de los requisitos propuestos a la hora de realizar el programa, es que dicho software se ejecute sobre una maquina cuyo sistema operativo se base en *UBUNTU*. Una vez fijado el sistema operativo, las razones por las que se escoge el lenguaje de programación son las siguientes:

- Necesidad de un lenguaje con potencial para implementar librerías que faciliten una interfaz de usuario gráfica (GUI), con el fin de realizar un programa amigable al usuario y fácil de utilizar. Esto no ocurre con un programa funcionando sobre la línea de comandos
- Interés por un lenguaje compilado y no interpretado. Pese a que los ordenadores actuales tienen potencia suficiente como para ejecutar cualquier programa, un software compilado siempre presenta ventajas de ejecución
- Gracias a un cierto conocimiento previo adquirido, no es necesario aprender cómo funciona ni aprender otros lenguajes de programación

Atendiendo a estos motivos, el lenguaje escogido para la programación del software es C++.

Para implementar el requisito de la interfaz gráfica de usuario, se ha escogido trabajar bajo librerías *QT*; de las cuales no se disponía de conocimiento previo, pero se ha obtenido un resultado óptimo del entorno gráfico.

3.1. Programación GUI QT

Es una biblioteca multiplataforma usada para desarrollar aplicaciones con interfaz gráfica de usuario. La ventaja de ser multiplataforma, es que se puede obtener el mismo programa para otro sistema operativo con pequeñas modificaciones. En el caso del trabajo realizado, el control del USB se realiza mediante el fichero `/dev/ttyUSB0`. Tan solo con modificar el código para que en vez de ser ese fichero el responsable del control, sea un puerto COM, se permitiría su compilación para un sistema operativo Windows.

Como entorno de desarrollo y compilador integrado, se utiliza "*QT creator*". Éste facilita, en la medida de lo posible, la creación y enlace de los componentes incluidos en cada "*widget*". De este modo, se acelera significativamente el proceso de programación. Por otro lado, el *IDE QT creator* ofrece ciertas herramientas muy interesantes, como la

facilitación de un depurador, autocompletado y, sobre todo, un entorno de programación limpio y sencillo. El instalador del *IDE* se puede encontrar en el repositorio de aplicaciones de *UBUNTU*.

3.1.1. Menú principal

Una vez iniciado el software controlador del ordenador, se ha programado de tal forma que en la ventana principal, se pueda ver una selección del dispositivo que se pretende analizar. En este punto, se encuentra la bifurcación más restrictiva. Esto es así porque el programa de análisis de diodos LED (o lámparas) y el programa de análisis de diodos láser, deben ir por caminos totalmente diferentes. Estos caminos se pueden ver tanto en el diagrama de flujo correspondiente 3.1 como en la Figura 3.2.

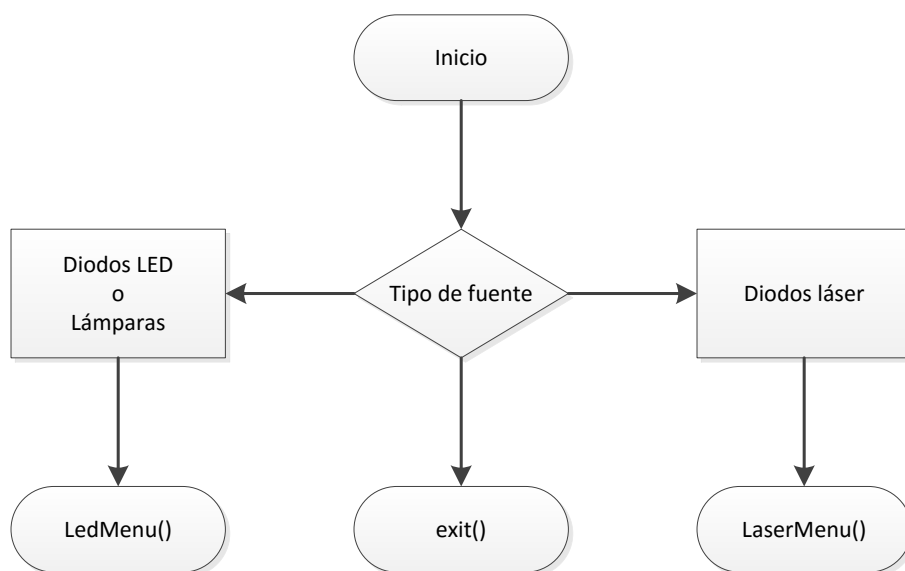


FIGURA 3.1: Diagrama de flujo de la función principal del PC



FIGURA 3.2: Menú principal del programa del ordenador

Para continuar al próximo menú se puede seleccionar cualquiera de los dos botones o presionar "Exit" para salir. Una vez presionado el botón de "LASER diodes" o "LED or lamps" se procede al submenú correspondiente de cada uno de ellos.

3.1.2. MENÚ LED

Dentro del menú de operación de los diodos LED, se encuentran todas y cada una de las funciones respectivas al análisis de diodos LED.

Este menú se implementa mediante una clase, cuyo constructor se encarga de comprobar la conexión con el microcontrolador encargado de realizar los análisis. Si el sistema de caracterización no se encuentra conectado al puerto USB, se notificará al usuario con una ventana de información. Esta ventana sirve para avisar al usuario de que no se permitirá la realización del análisis si no se realiza la conexión previa con el sistema. No obstante, aunque no se permita la realización de análisis, sí que se permite entrar en el menú de diodos LED, ya que varias de sus funcionalidades no dependen de los análisis; y por lo tanto de la conexión con el dispositivo.

La ventana informativa de notificación al usuario se puede ver en la Figura 3.3. Pulsando el botón de "OK" se accede directamente al menú de control.



FIGURA 3.3: Aviso de conexión no establecida

A continuación, se explican las pestañas correspondientes a la ventana principal de este menú:

- **Scan:** Ventana de análisis espectral
- **Last Scans:** Pestaña de últimos análisis
- **Installation:** Pestaña de instalación

3.1.2.1. Pestaña “Scan”

En la pestaña correspondiente a “Scan”, se pueden realizar análisis espectrales para diodos LED. En esta pestaña, se tienen que definir los parámetros correspondientes para el análisis, como se detalla en el Capítulo 2 en el punto 2.4.1.2.

Una vez dentro del menú de análisis, si la conexión establecida por el constructor se ha dado de forma correcta (el microcontrolador está conectado), se habilitan los escaneos y funciones correspondientes con el mismo dispositivo. El menú de análisis con las funcionalidades inhabilitadas, se puede ver en la Figura 3.4.

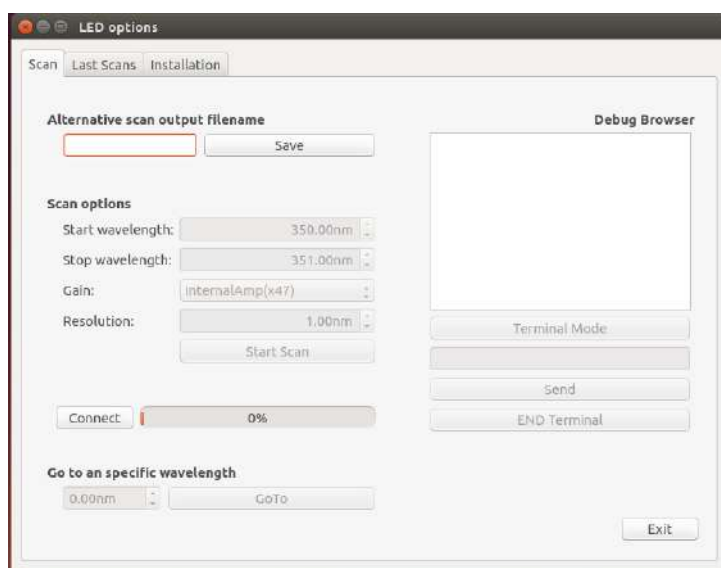


FIGURA 3.4: Ventana de análisis de diodos LED

Por el contrario, si el constructor ha fallado a la hora de conectar con el microcontrolador, se puede presionar el botón de “connect” para volver a intentar el establecimiento de la conexión. El menú de análisis con la conexión establecida de forma correcta se puede ver en la Figura 3.5.

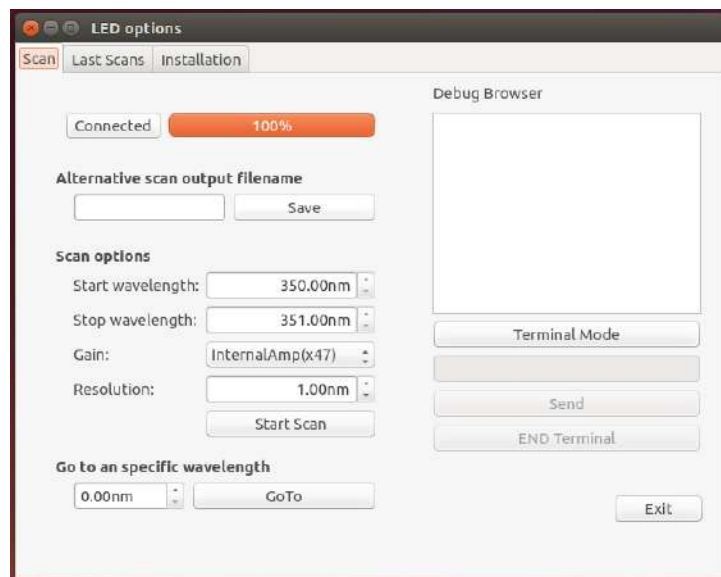


FIGURA 3.5: Ventana de análisis de diodos LED con conexión al microcontrolador

Antes de realizar cualquier análisis, es necesario comprobar que el monocromador se encuentra conectado al terminal *DB9*, correspondiente del sistema de caracterización. De no ser así, el monocromador no responde a los comandos enviados, bloqueando el microcontrolador e impidiendo la realización de los respectivos análisis.

Dentro de esta pestaña de control (*Scan*), se pueden realizar las siguientes operaciones:

- Conectar con el microcontrolador si la conexión no se ha establecido en el constructor (botón “*Connect*”)
- Cambiar el nombre del fichero de salida del análisis. Para ello escribir el nombre en el cuadro de texto de “*Alternative scan output filename*” y presionar botón “*Save*”
 - Si no se modifica el nombre por defecto del análisis, el fichero de salida obtendrá, como nombre, la combinación de los siguientes parámetros significativos del análisis (unidos por un guión “-”):
 - “fecha”
 - Start“longitud de onda de inicio”
 - Stop“longitud de onda final”
 - R“resolución”
 - Gx“ganancia”
 - Como ejemplo de un análisis cuyo nombre no ha sido modificado se tiene el siguiente nombre de fichero:


```
20160602125040-Start350,00-Stop351,00-R1,00-Gx414
```
- Seleccionar los parámetros de análisis:
 - Longitud de onda inicial (*Start wavelength*)

- Longitud de onda final (*Stop wavelength*)
- Ganancia para los bloques de acondicionamiento de la señal de entrada (*Gain*).

La forma en la que se selecciona la ganancia, depende de un menú desplegable, que ofrece todas las posibilidades admitidas por el sistema de caracterización. La Figura 3.6 representa dicho menú desplegable.

Una vez se seleccione la ganancia, hay que prestar especial atención al jumper hardware que se encuentra a la entrada del sistema (conectores BNC y SMA). Lo que quiere decir que, dependiendo del tipo de ganancia que se seleccione (interna o externa), hay que asegurarse de que el jumper se encuentra en la posición correcta. Este jumper corresponde con el switch SW2 de la Figura B.10.

- Resolución espectral (*Resolution*)
 - Botón de inicio de análisis ("*Start Scan*")
 - Enviar al monocromador a una longitud de onda específica (botón "*GoTo*")
 - Botón de modo terminal, para establecer una comunicación directa con el monocromador. Una vez presionado el botón de modo terminal, se deshabilitan las operaciones de análisis y se habilitan los botones de envío ("*Send*") y fin del modo terminal ("*END Terminal*")
 - Botón de salida ("*Exit*")

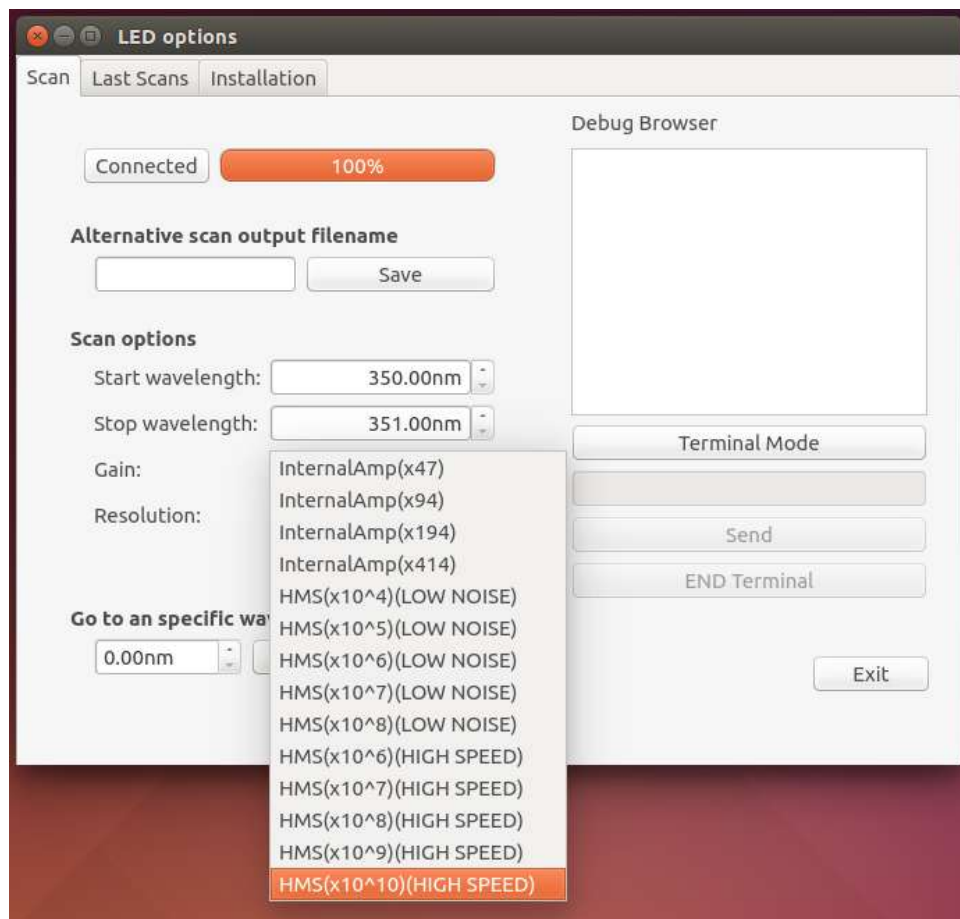


FIGURA 3.6: Lista de ganancias de entrada disponibles

Botón “GoTo”: Una de las opciones principales de la pestaña “Scan”, corresponde con la funcionalidad que se le atribuye al botón “GoTo”. Gracias a este botón se puede enviar al monocromador a la longitud de onda concreta que se introduzca en la caja de la izquierda del botón.

Una vez introducida la longitud de onda destino y pulsado el botón “GoTo”, la función se encarga de enviar los parámetros correspondientes al microcontrolador. Con estos parámetros, el microcontrolador se encarga de la comunicación con el monocromador y del control del mismo. Como valores de retorno del microcontrolador, se obtiene un seguimiento (eco) de lo que el microcontrolador envía y recibe del monocromador. Todos estos valores retornados se muestran sobre la pantalla “Debug Browser” y en ella se puede comprobar el estado de la función.

Los parámetros que se le envían al microcontrolador para efectuar esta función, se envían en una cadena de doce caracteres estructurados del siguiente forma:

- Los cinco primeros caracteres corresponden al código asignado para la función de ir a una longitud de onda *LEDGT*
- Los cuatro siguientes caracteres corresponden con la parte entera de la longitud de onda destino en nanómetros
- El siguiente carácter corresponde con el punto decimal

- Los dos últimos caracteres corresponden con la parte decimal de la longitud de onda en nanómetros

Una vez se ha formado la cadena de caracteres, se envía por el puerto serie para que la reciba el microcontrolador. Por lo tanto, como ejemplo explicativo para este hecho se tiene el siguiente:

Si se quiere enviar al monocromador a la longitud de onda correspondiente a 900.2 nm, la cadena formada por el software del ordenador, y que posteriormente se envía al microcontrolador, es la siguiente:

LEDGT900.20

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo que explica el funcionamiento tras pulsar el botón “GoTo”.

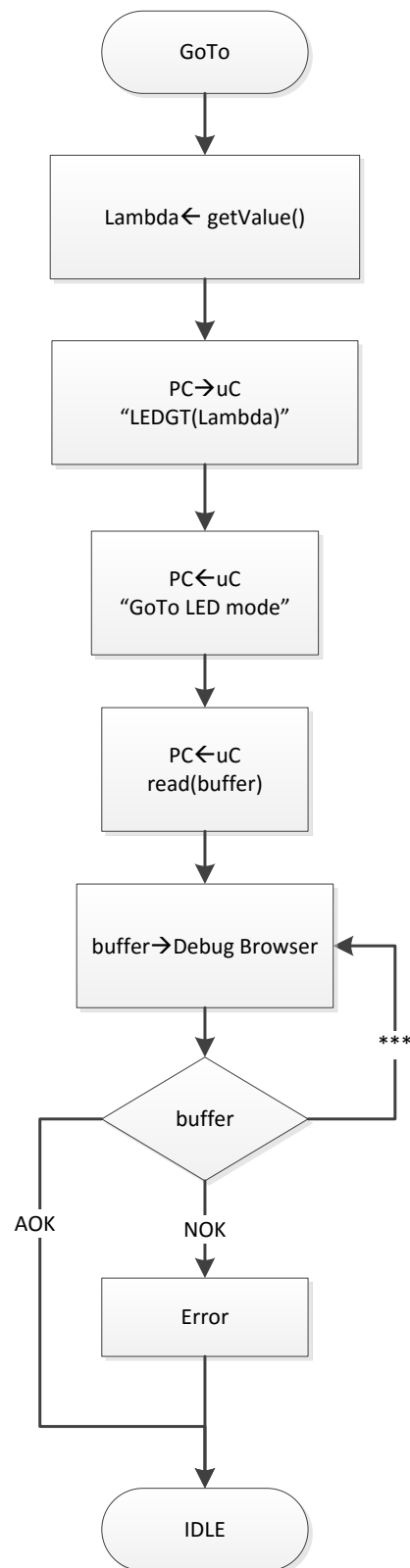


FIGURA 3.7: Diagrama de flujo de la función "GoTo" en el PC

Botón “Start Scan”: Es otra de las principales opciones de la pestaña “Scan”. Para la utilización de este botón, es recomendable haber seleccionado los parámetros que se desean analizar. Si no se ha seleccionado ningún parámetro en concreto, se utilizan los fijados por defecto.

Una vez pulsado el botón, el primer paso que se realiza es obtener los parámetros necesarios de la interfaz gráfica. Después, se construye la cadena de 25 caracteres que espera recibir el microcontrolador. Ésta se compone de la siguiente forma:

- Los cinco primeros caracteres corresponden al código asignado para la función de análisis *LEDSC*
- Los siguientes seis caracteres corresponden con la longitud de onda desde la que se quiere empezar. En este caso, son seis caracteres y no siete como en la función *LEDGT*. El principal motivo de este cambio es facilitar el bucle del microcontrolador. Por lo tanto, siendo seis caracteres, el correspondiente valor de longitud de onda se codifica simplemente multiplicando por cien. De este modo, se elimina el punto decimal y se evita que el microcontrolador tenga problemas al no trabajar con números en punto flotante
- Los otros siguientes seis caracteres, corresponden con la longitud de onda destino que se quiere alcanzar en el análisis. De igual forma y con el mismo objetivo que la longitud de inicio, ésta se multiplica por cien
- Tras los caracteres correspondientes a la longitud de onda, se envían también seis caracteres correspondientes con la sensibilidad. Debido a que la sensibilidad mínima es de 0.01 nm, ésta también se multiplica por cien, consiguiendo así la correspondencia exacta a la longitud de onda. De este modo, se consigue que todos los valores con los que opera el microcontrolador sean enteros. El límite superior de sensibilidad fijado, atiende al número de caracteres reservados para este parámetro. Nunca se va a fijar la sensibilidad en un número grande, ya que se desperdician las características del monocromador
- Los dos últimos caracteres definen la ganancia aplicada al sistema. A pesar de que estos dos caracteres sean de ocho bits, se van a tratar de forma que el microcontrolador los interprete como si se tratasen de un único bit. Esto ofrece cuatro posibilidades que corresponden con cuatro ganancias internas posibles para cuatro códigos de ganancia. Además los dos caracteres mencionados, tienen correspondencia directa con las señales *GAIN0* y *GAIN1* como se ve en la tabla B.11 del punto correspondiente a la amplificación interna B.10.0.2.
Por otro lado, si la amplificación de la señal de entrada se realiza mediante el amplificador externo, estos dos caracteres son insignificantes. Entonces, el software se encarga de avisar al usuario mediante un mensaje de notificación, para que se asegure de que el amplificador se encuentra en la ganancia correspondiente a la seleccionada.

Se quiere realizar un análisis con los siguientes parámetros:

- Longitud de inicio de escaneo de 400.00 nm
- Longitud final del escaneo de 600.00 nm
- Resolución espectral de 1 nm
- Ganancia del amplificador de $\times 10^4$

La cadena que se construye con los parámetros anteriores, y que será la que se envíe al microcontrolador, es la siguiente:

LEDSC04000006000000010000

Como se puede observar en el citado ejemplo, la ganancia del amplificador interno corresponde con una ganancia de "0". Esto se debe a que la ganancia de $\times 10^4$ es la correspondiente al amplificador externo, por lo que es insignificante el valor del interno.

Una vez formada la cadena de datos a transmitir, el software del ordenador se encarga de enviar dicha cadena al microcontrolador. A continuación el ordenador recibe del microcontrolador la confirmación mediante la cadena de caracteres "Scanning LED mode". Una vez enviada dicha confirmación, el microcontrolador empieza a realizar su bucle de escaneo a la par que el ordenador comienza su propio bucle en el que se esperan los datos. Cada cadena recibida por el microcontrolador, se compara con los valores que espera recibir. Si los datos recibidos contienen la longitud de onda más el valor del convertidor (nivel), significa que los datos son correctos y se almacenan. No obstante, antes de ser almacenados el software realiza las operaciones pertinentes para el cálculo de la potencia óptica; tras lo cual se almacenan en el fichero correspondiente. El primer cálculo que se realiza corresponde con la resta del nivel de ruido en oscuridad. Este valor depende de cada ganancia seleccionada, por lo que en la carpeta de calibraciones se tienen los ficheros correspondientes al ruido en cada ganancia. Si estos ficheros no se encuentran en la carpeta, se deben de recalibrar y regenerar de nuevo, con el botón correspondiente a "Recalculate Value" de Backlight offset, en el menú de instalación.

Una vez se tiene el valor del offset, el otro valor que hace falta calcular corresponde al valor de responsividad del fotodiodo. Este valor se busca en el fichero correspondiente teniendo en cuenta la longitud de onda. El fichero propiamente dicho, es el que se extrae de la curva del fotodiodo, obtenida en el punto 3.2 de este mismo capítulo.

Cuando se tienen todos los datos, calcular la potencia óptica para la muestra es tan sencillo como aplicar la siguiente Ecuación 3.1.

$$P_{OPT} = \frac{(LevelADC_{Sample} - LevelADC_{Backlight}) \times 3,3}{1024 \times Responsivity \times Gain} \quad (3.1)$$

Tan pronto como se almacena un valor, se envía un ACK. Ésto indica al microcontrolador que se ha confirmado un dato y se le está solicitando el siguiente. Entonces, el microcontrolador continúa con su bucle enviando el siguiente dato.

Por otro lado, si el dato recibido por el microcontrolador es distinto de la estructura esperada (longitud de onda más dato), se finaliza el análisis por error en los datos transmitidos y se notifica del error. Posteriormente se puede solicitar una retransmisión.

Una vez finalizado el análisis por parte del microcontrolador, éste envía una última cadena de caracteres correspondiente al control de errores. Esta cadena puede contener un *AOK* o un *NOK*. En el caso del *AOK*, se finaliza el escaneo y se envían los datos correspondientes a *GNU PLOT* para que los dibuje. En caso contrario, si se recibe un *NOK*, se notifica del problema al usuario final. Como medida complementaria, se descartan los datos recibidos hasta el momento y se vuelve a intentar el análisis una vez más. Si el segundo intento de análisis, concluye con otro error, se desiste. Si se recibe cualquier otro tipo de datos fuera de los códigos esperados, se consideran como erróneos aplicando la misma funcionalidad que si se recibiese *NOK*.

En el diagrama de flujo de la Figura 3.8, se puede observar el modo de operación del análisis tras pulsar el botón “*Start Scan*”.

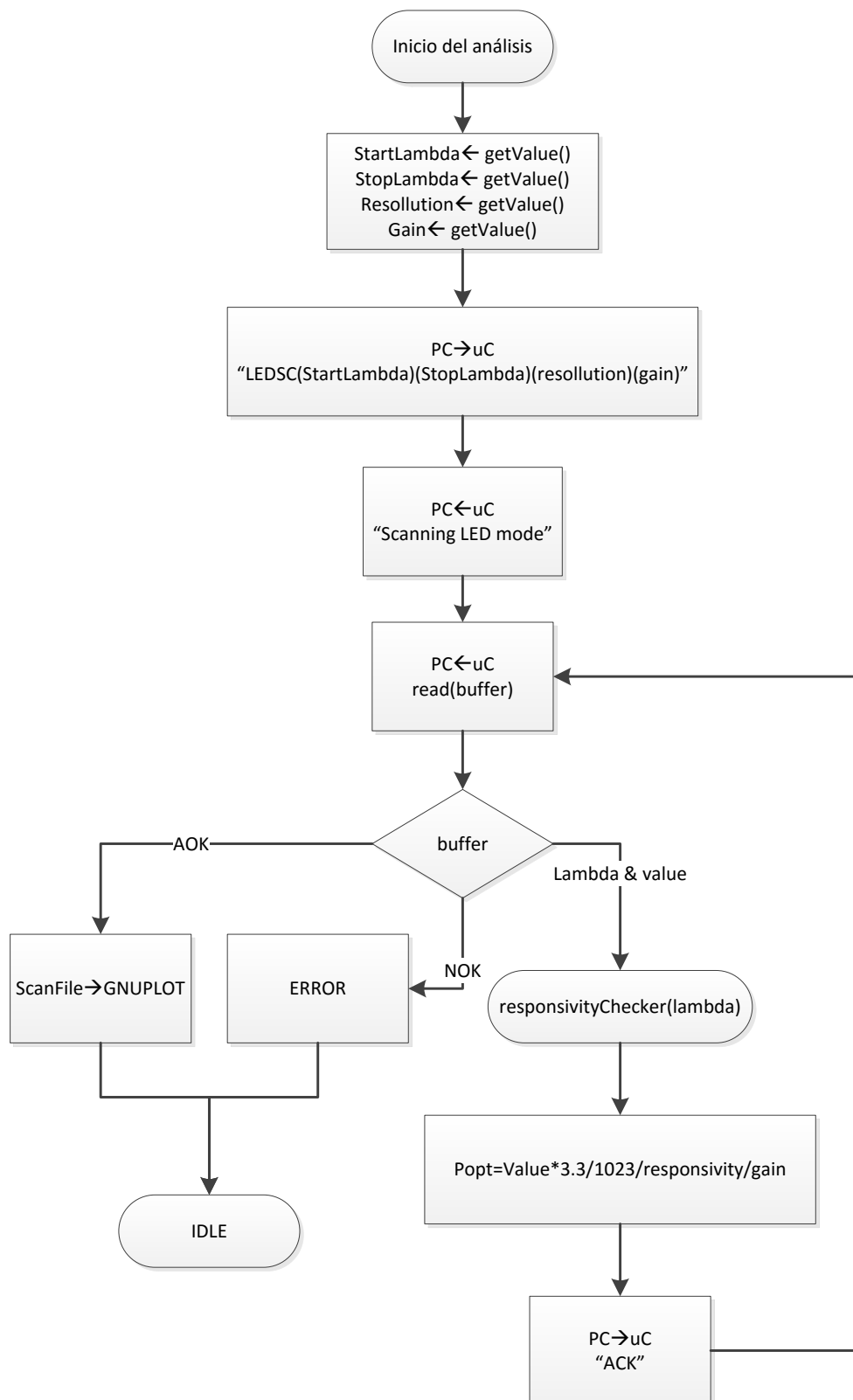


FIGURA 3.8: Diagrama de flujo de la función de análisis en el PC

3.1.2.2. Pestaña “Last Scans”

Last Scans es otra de las pestañas del menú LED. En esta pestaña, se puede ver una lista que contiene los diez últimos análisis realizados.

Por otro lado, se tiene la opción de importar un escaneo realizado en cualquier otro momento. La única restricción para importar un análisis, es que los datos tengan el formato adecuado (Longitud de onda(nm) Corriente fotogenerada(mA) Responsividad(A/W) Potencia óptica(mW)).

Si se presiona sobre el botón de “Browse”, se abre un explorador de ficheros en una nueva ventana. En él, se puede seleccionar el análisis que interesa importar. Una vez seleccionado, se presiona “Import Scan”. El fichero introducido se sitúa en primera posición de los análisis realizados, por lo que si se vuelve a realizar un análisis, el importado no desaparece sino que se desplaza una posición.

La Figura 3.9 muestra la pestaña descrita. Los análisis que aparecen fueron los realizados durante los análisis de pruebas.

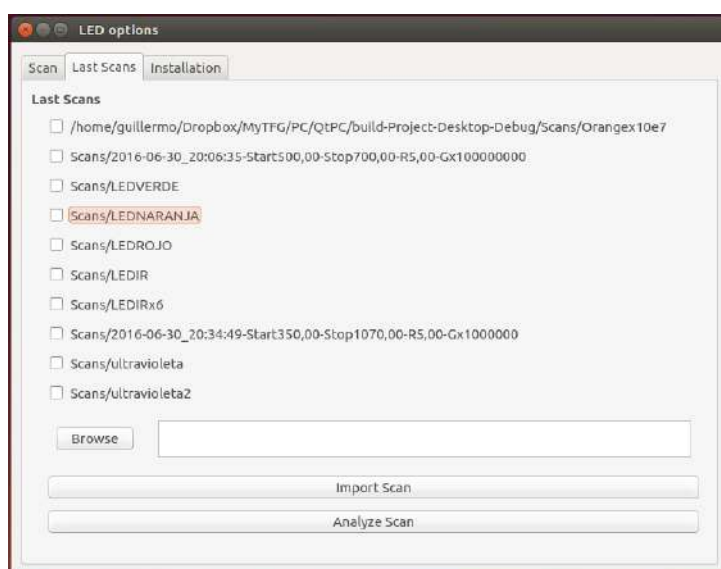


FIGURA 3.9: Pestaña de anteriores análisis

Si se presiona el botón “Analyze Scan”, analiza el escaneo que se ha seleccionado. Se pueden realizar análisis múltiples si se seleccionan varios escaneos a la vez. Esto se ve en el apartado correspondiente a los análisis de resultados 4.2.

3.1.2.3. Pestaña “Installation”

En la pestaña de instalación se encuentran las opciones de modificación de parámetros involucrados en el análisis. Por ejemplo, se presentan los botones correspondientes con la instalación de nuevas rejillas o nuevas torres para el monocromador. Se han conservado estos dos botones, respecto al software original del monocromador, por la posibilidad de ampliar el hardware. Por el momento solo se dispone de una rejilla y de una torre.

Por otro lado, también se encuentran los controles sobre el offset en oscuridad, así como el control sobre la curva de responsividad del fotodiodo:

- Offset en oscuridad: Corresponde con la ganancia del amplificador de entrada cuando a la entrada del monocromador no hay luz. Debido a la posibilidad de que se cambie el fotodiodo o el amplificador de ganancia, así como por pérdida de los ficheros correspondientes, se hace necesaria la opción de recalcular los valores. Para poder recalcular este valor, hace falta que el microcontrolador se encuentre conectado. Se calcula de igual manera que se realiza un análisis, pero tapando el orificio de entrada del monocromador. El proceso que se sigue a la hora de calcular el offset en oscuridad, es el que se ve en el diagrama de flujo de la Figura 3.11
- Responsividad: Se dan las opciones tanto de ver la curva de responsividad como de cambiarla por otra. Esta curva depende del fotodiodo utilizado, mientras no se cambie el fotodiodo SI-440, no es recomendable cambiar la curva. Para ver la curva de responsividad actual, no se necesita autorización, por lo que se puede presionar el botón "See responsivity curve" en cualquier momento. La curva por defecto proporcionada por el fabricante y digitalizada se puede ver en la Figura 3.10

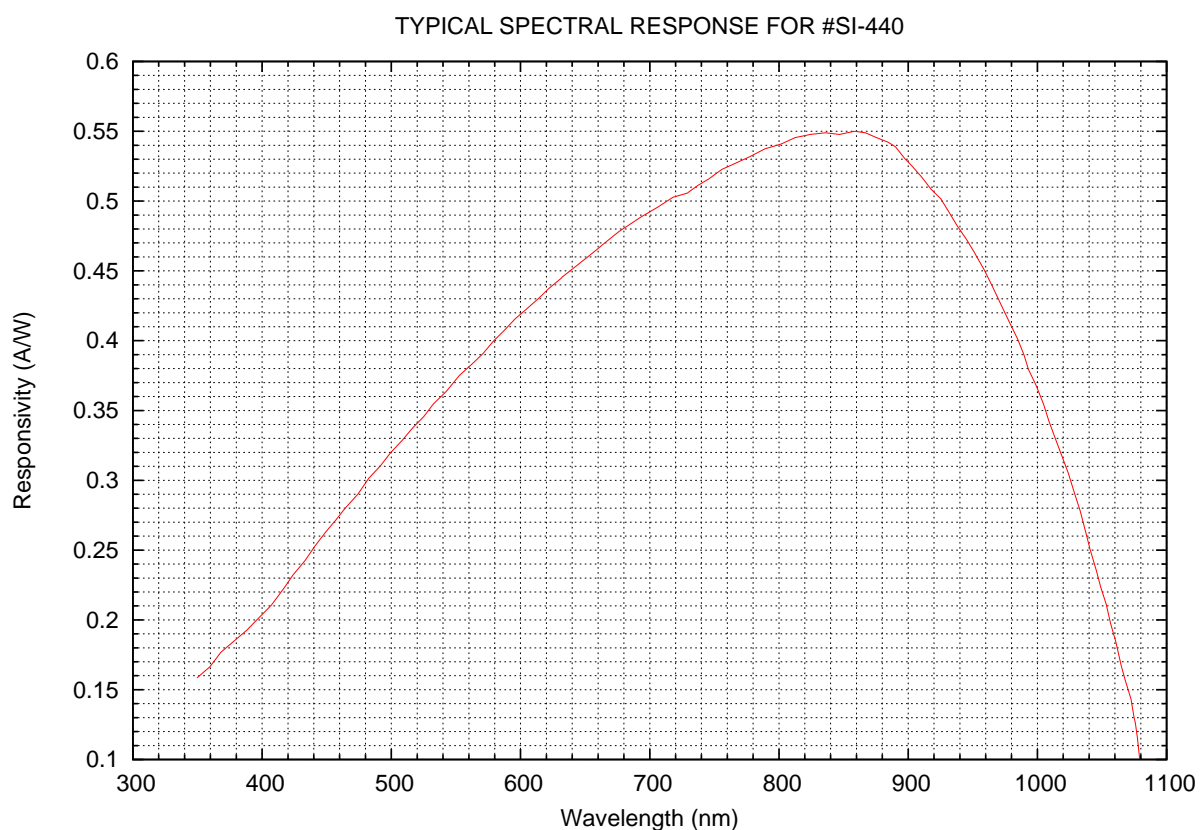


FIGURA 3.10: Curva de calibración del fotodiodo SI-440 digitalizada

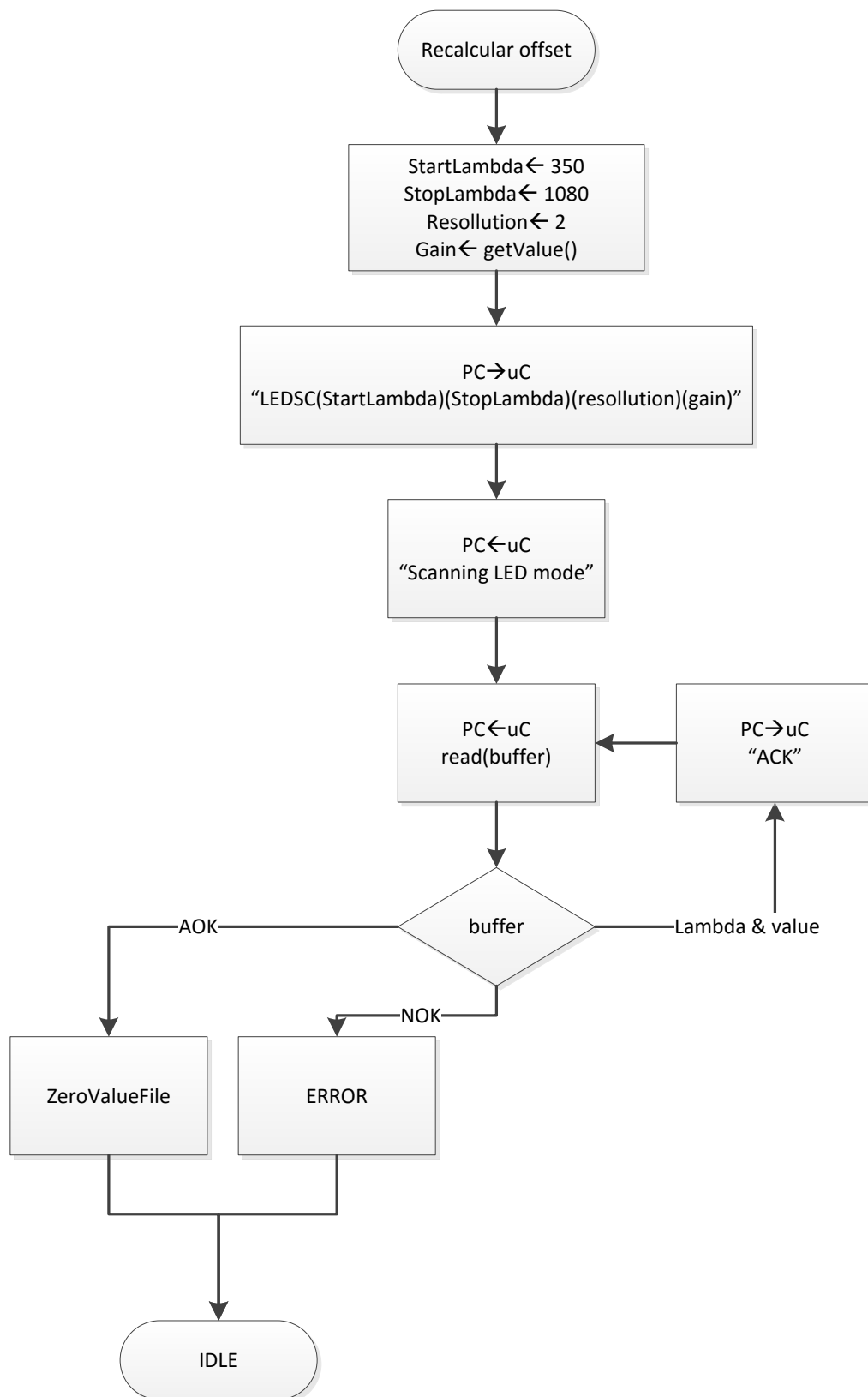


FIGURA 3.11: Diagrama de flujo de calibración del offset en oscuridad

Para proceder a la instalación de nuevo hardware o modificar los ficheros de calibración, es necesario la autorización mediante contraseña. Si no se introduce contraseña y usuario, no se habilitan los botones de instalación. En la Figura 3.12 se puede ver la pestaña descrita antes de la autorización.

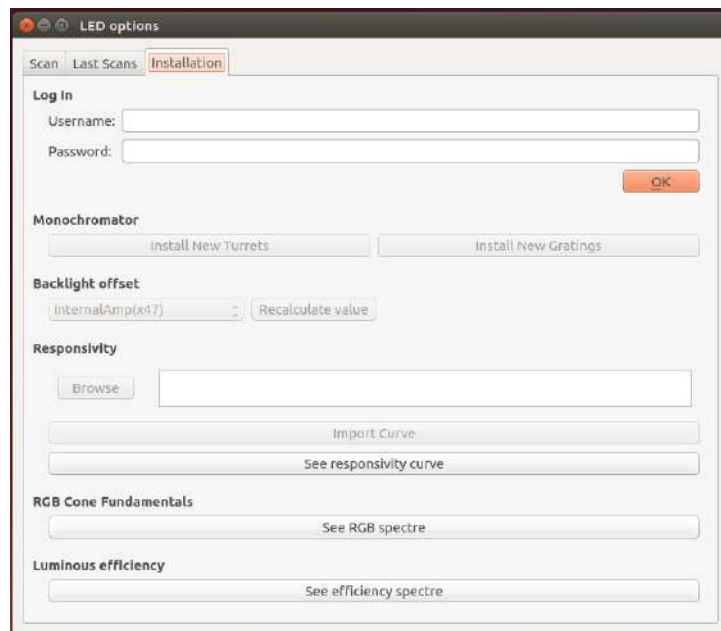


FIGURA 3.12: Pestaña de instalación del monocromador sin autorización

El usuario y la contraseña de autorización son los siguientes:

Username: monocrom

Password: SP300i@L022

Una vez introducida la autorización correcta, los botones se habilitan como se puede observar en la Figura 3.13.

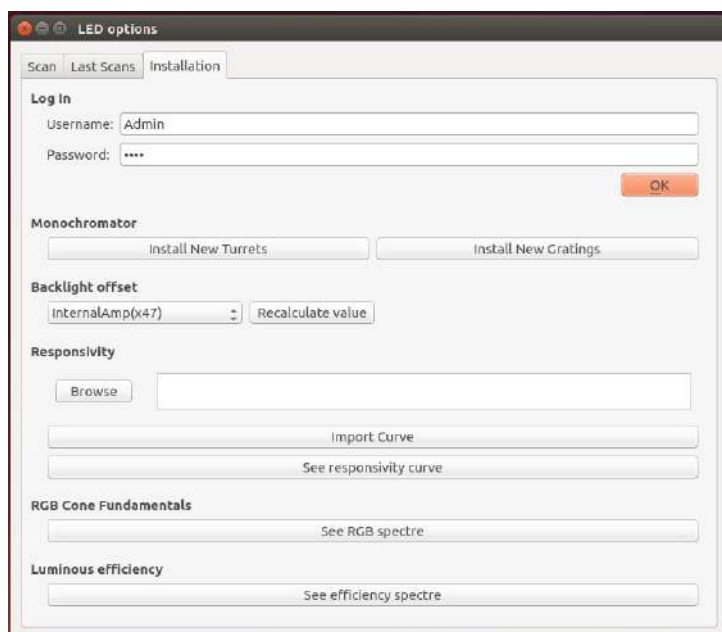


FIGURA 3.13: Pestaña de instalación del monocromador con autorización

Tanto si la contraseña introducida es correcta como si no lo es, el usuario es notificado mediante los cuadros de información que se pueden ver en la Figura 3.14.



(A) Contraseña correcta



(B) Error al introducir la contraseña

FIGURA 3.14: Mensajes de información de autenticación

Finalmente, el menú de instalación ofrece la posibilidad de visualizar las curvas de eficacia luminosa y de los conos del ojo humano.

La curva de eficacia luminosa representa cómo de bien ve el ojo humano las diferentes longitudes de onda. En este trabajo se utiliza esta curva cuando se calcula la potencia eficaz de luz, así como la longitud de onda, para el pico de emisión visual. Así mismo, cada vez que se realiza un análisis, se ofrece la posibilidad de mostrar el espectro escalado al ojo humano.

La curva de eficacia luminosa corresponde con la Figura 3.15.

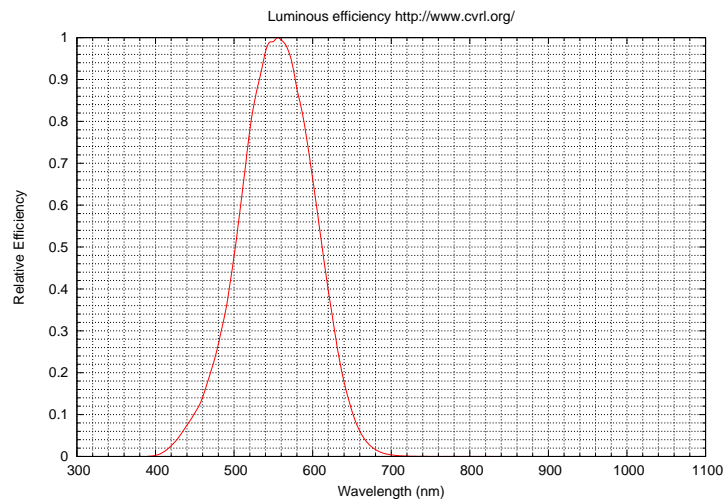


FIGURA 3.15: Respuesta de la eficacia luminosa del ojo humano (<http://www.cvrl.org/>)

La eficacia luminosa presenta un máximo en la longitud de onda de 555 nm. Por esto, el color verde, es el color que mejor capta el ojo humano. Cuando se calcula el flujo luminoso, los LED o láser de color verde, obtienen mayor flujo luminoso frente a los de infrarrojo, por ejemplo. Estos últimos escalan a cero debido a que el ojo humano no capta el infrarrojo.

Otra opción que ofrece este menú, es la posibilidad de visualizar la respuesta de los conos rojo, verde y azul del ojo humano. En la Figura 3.16 se puede ver esta representación.

Los conos del ojo se encargan de la percepción del color, por esto, se pretende que con estas gráficas se obtenga el color por medio del procesado de sus curvas. Por el momento, el software detecta el color del LED por el máximo de emisión del espectro. Esto implica un problema a la hora de detectar colores de LED como el blanco, que se forma mediante la composición de colores.

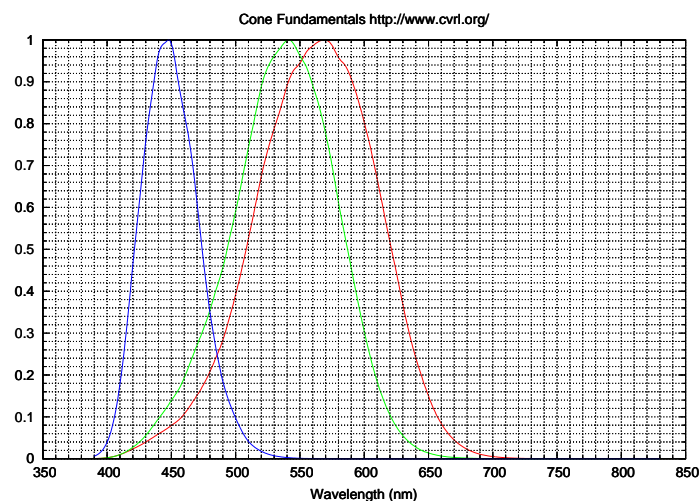


FIGURA 3.16: Respuesta de los conos del ojo humano (<http://www.cvrl.org/>)

En el caso de que se haga necesario modificar las curvas, se pueden reemplazar directamente los ficheros correspondientes de la carpeta de calibraciones. Es recomendable hacer una copia de los ficheros que se reemplacen para no perder los datos.

Tanto los datos de la eficiencia luminosa [7], como los datos sobre los colores [8], se han obtenido del laboratorio de investigación del color y la visión. Si se necesita disponer de otro tipo de datos, se pueden encontrar en la pagina web:

<http://www.cvrl.org/>

3.1.3. MENÚ LASER

El menú láser, corresponde con el segundo menú principal de la aplicación. Este segundo menú completa el de diodos LED. Añade el control de potencia por medio del driver de diodos láser *LDD100-1P*, así como, el control de la temperatura por medio del integrado *HTC-1500*.

De igual manera que en el menú de diodos LED, el constructor de la clase se encarga de establecer la comunicación con el microcontrolador. Si el intento de conexión falla, se muestra el mensaje de información igual que sucedía con el otro menú. Cuando no se establece comunicación, no se pueden realizar análisis ni ningún otro tipo de operación que requiera el uso del microcontrolador. La Figura 3.17 muestra el menú de análisis de diodos láser cuando el microcontrolador no se encuentra conectado.

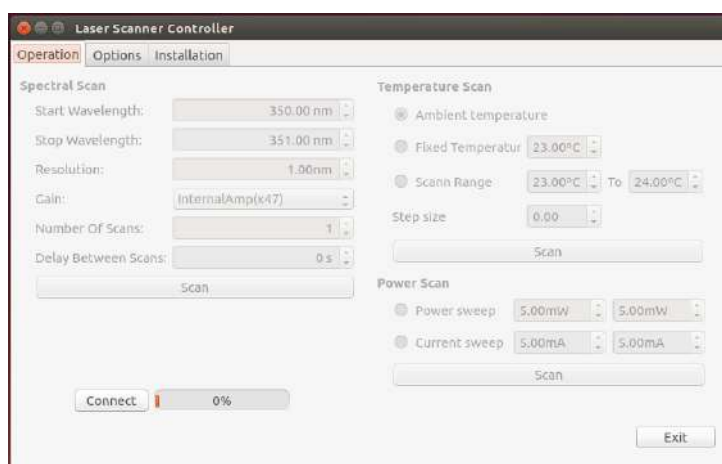


FIGURA 3.17: Ventana de análisis de diodos láser, medios desconectados

Si el constructor falla a la hora de realizar la conexión, se puede volver a intentar presionando el botón “Connect”. De esta forma, si el microcontrolador ya se encuentra conectado correctamente, la barra de conexión alcanza el 100 % y la conexión queda establecida; habilitando las distintas opciones de análisis. La Figura 3.18 muestra el menú en el caso de estar conectado.

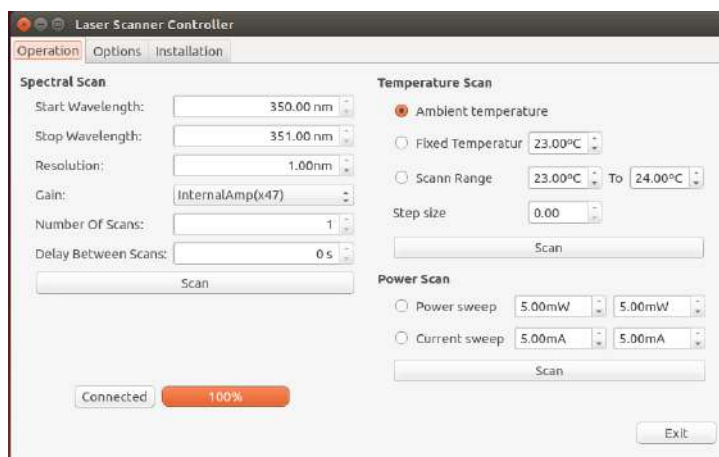


FIGURA 3.18: Ventana de análisis de diodos láser, con microcontrolador conectado

La segunda pestaña de operación del menú de diodos láser (*options*), corresponde con una pestaña de opciones. Entre otras, ofrece la posibilidad de ver la curva de responsividad del fotodiodo. Este menú, ofrece también la posibilidad de calibrar el sensor termoeléctrico del módulo de soporte de diodos. Este sensor, correspondiente al termistor *Dale 1T002-5*, queda especificado en el Apéndice A punto A.6.4. Los correspondientes valores de **Temperatura-Resistencia**, se pueden obtener de dos formas:

- Como primera opción, se puede consultar la hoja de especificaciones del fabricante, en la que se ofrece una tabla de correspondencias. Esta hoja de especificaciones se encuentra en el Apéndice C, punto C.1
- Como segunda opción, y probablemente más interesante, se puede obtener estos valores por medio de las ecuaciones de Steinhart-Hart. Gracias a la potencia de cálculo de los ordenadores actuales, este cálculo no supone un tiempo excesivo. De este modo, si se tienen los coeficientes de Steinhart, es sencillo calcular la resistencia que se produce para una temperatura dada.

Probablemente con el paso de los años, el sensor no responderá de igual manera. Es muy recomendable que en el momento de su uso, se realice una nueva calibración de la curva por medio de tres puntos. Teniendo tres temperaturas conocidas, se pueden obtener los nuevos valores de los coeficientes de Steinhart-Hart. De no recalibrarse el termistor, el controlador de temperatura *HTC-1500*, ofrecería unas medidas erróneas pese a su extraordinaria sensibilidad de temperatura $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las ecuaciones de Steinhart-Hart corresponden con las ecuaciones A.7 y A.8 estudiadas en el Apéndice A.

En la Figura 3.19 se puede ver la pestaña correspondiente con las opciones de diodos láser.

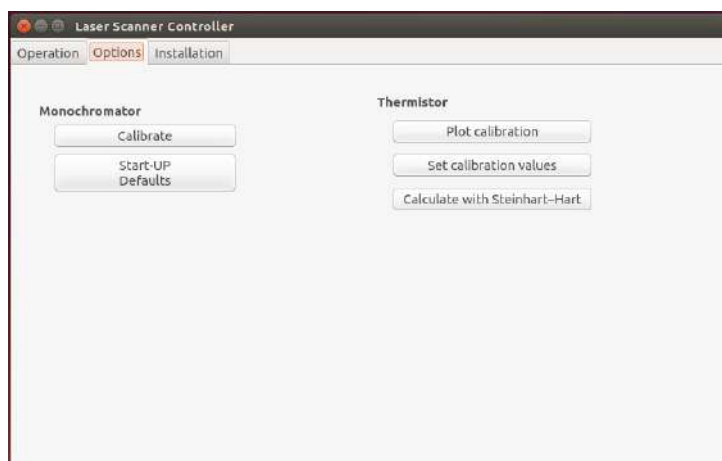


FIGURA 3.19: Pestaña de opciones del menú de diodos láser

3.1.3.1. Calibración del sensor de temperatura

Dentro del menú de opciones, la agrupación correspondiente al control del termistor se presenta tres botones:

- “*Plot calibration*”: Pulsando este botón se representa por pantalla la calibración actual correspondiente al termistor
- “*Set calibration values*”: Pulsando este botón se modifica el fichero por el que se leen los valores de calibración. Es importante que el correspondiente fichero tenga los formatos adecuados
- “*Calculate with Steinhart-Hart*”: Pulsando este botón se abre un nuevo menú por el que se calculan nuevos valores de Resistencia-Temperatura, mediante las ecuaciones de Steinhart. Este menú se puede ver en la Figura 3.20

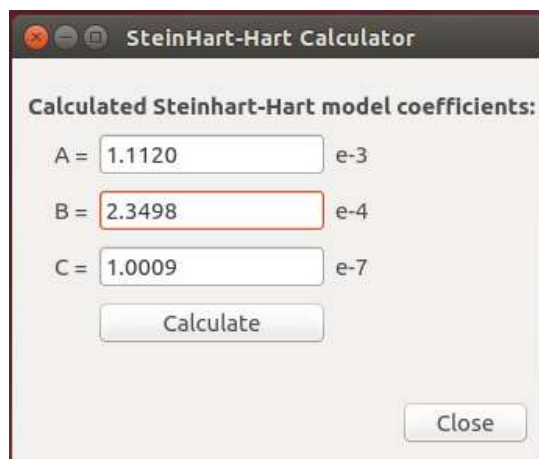


FIGURA 3.20: Calculadora de Steinhart

Una vez dentro del menú de cálculo de los valores Resistencia-Temperatura, solo se tiene que introducir el valor de los correspondientes coeficientes y presionar el botón “*Calculate*”. Esta función se encarga de calcular los valores para todo el rango de

temperaturas. Una vez finalizado el cálculo, se muestra por pantalla la gráfica correspondiente y se genera el fichero de resultados de calibración. Si se desea la utilización del fichero generado por Steinhart-Hart, una vez utilizada la calculadora, se tiene que importar dicho fichero mediante el botón “*Set calibration values*”.

La gráfica generada por esta calculadora para los coeficientes ofrecidos por el fabricante, es la que se puede ver en la Figura 3.21.

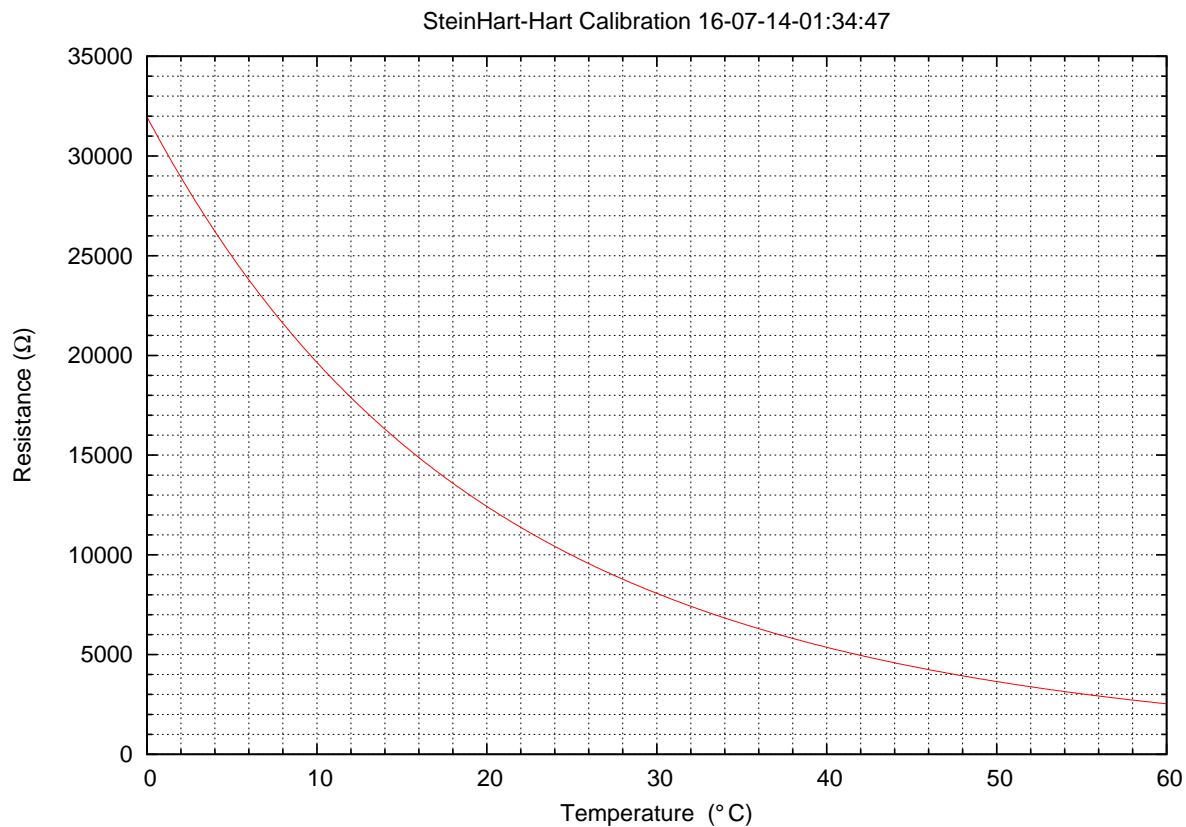


FIGURA 3.21: Calibración por medio de la calculadora de Steinhart

El modo de operar de esta función se puede ver en el diagrama de flujo correspondiente con la Figura 3.22.

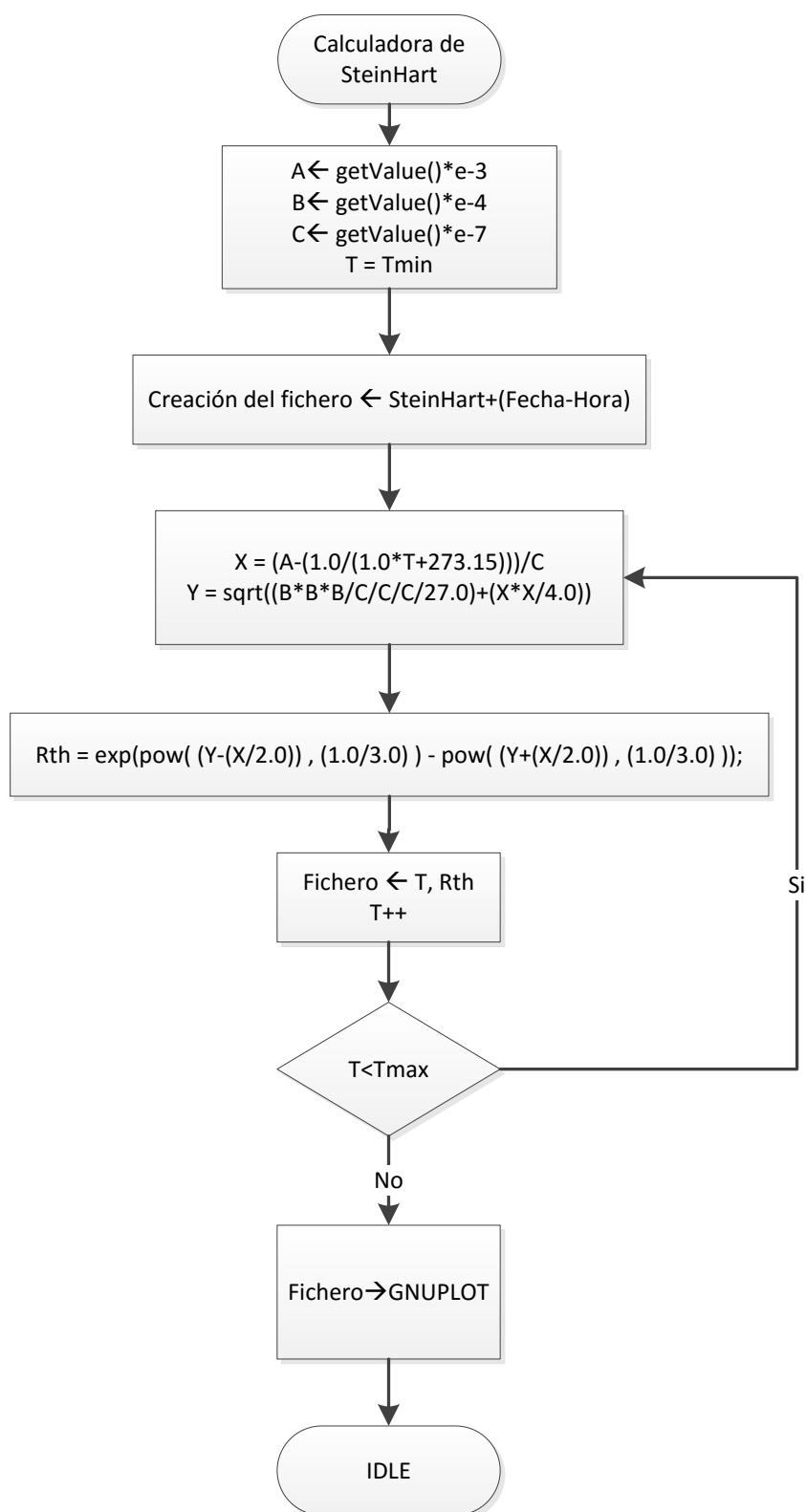


FIGURA 3.22: Diagrama de flujo de la función de Steinhart

3.1.3.2. Calibración del monocromador

La pestaña de opciones del menú de diodos láser ofrece, a su vez, una cierta asociación directa con el monocromador. Si se presiona el botón “*Calibrate*”, el software controlador se debe encargar de solicitar la calibración al monocromador. Una vez solicitada, se abre una ventana que muestra la calibración del offset y del gadjust para cada rejilla. Esta ventana se puede ver en la Figura 3.23.

El otro botón que ofrece este menú es del de “*Start-Up Defaults*”. Este botón debe restablecer los ajustes predeterminados del monocromador.

Tanto el botón “*Calibrate*” como el botón “*Start-Up Defaults*”, se han añadido al menú por compatibilidad con el software oficial del monocromador, aunque de momento no se utilizan.

Grating	Offset	Gadjust
1	0	98000
2	1536000	98000
3	3072000	98000
4	0	98000
5	1536000	98000
6	3072000	98000
7	0	98000
8	1536000	98000
9	3072000	98000

Buttons: Print, Save, Restore, Exit

FIGURA 3.23: Ventana de calibraciones propias del monocromador

3.2. Calibración del fotodiodo

El fotodiodo utilizado es el *SI-440*, estudiado en el Apéndice A, punto A.3. La curva de responsividad que muestra este fotodiodo, se puede ver en la Figura A.15. Como se comentó en la función de realizar un escaneo, si se desea obtener la medida correspondiente a la emisión de luz introducida, es necesario la utilización de esta curva.

El fabricante ofrece en sus hojas de especificaciones la respuesta del fotodiodo. Esta curva se encuentra en una imagen dentro del mismo documento, por lo tanto se tiene que digitalizar para pasar del formato imagen a un formato fichero en el que se tenga la longitud de onda frente a la responsividad.

Para conseguir digitalizar la curva, se utiliza un programa dedicado a este tipo de tareas. El programa utilizado en cuestión es el “*WebPlotDigitizer*”[14]. Este software ofrece una versión Web de un servicio de extracción de datos a partir de gráficos. Existen multitud de programas que ofrecen los mismos resultados, pero se escoge este programa para evitar realizar una instalación innecesaria.

El procedimiento que se sigue con este software es el siguiente:

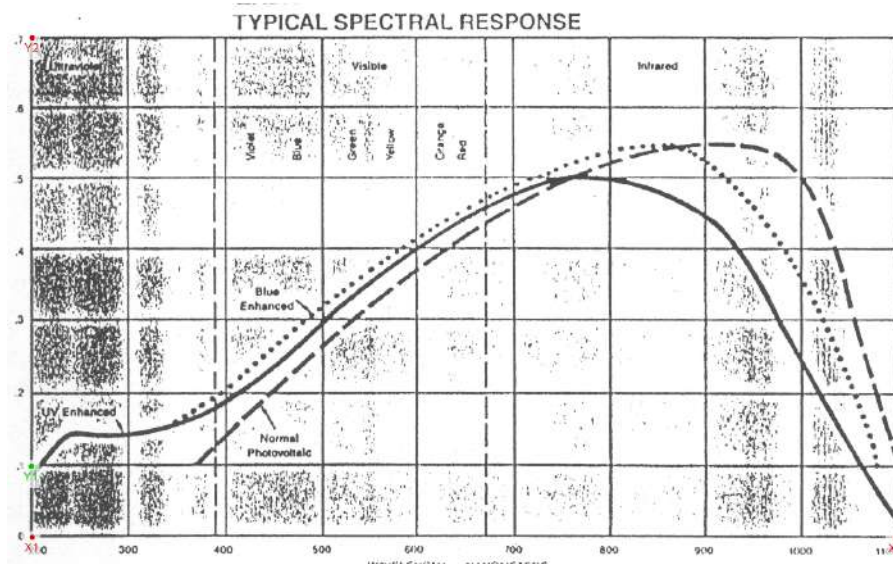
1. Se carga el archivo a digitalizar en la aplicación web

2. Se selecciona como tipo de datos un archivo 2D calibrado X-Y
3. El siguiente paso es la fijación de los ejes, de tal manera que primero se seleccionan dos puntos del eje X conocidos y después dos puntos conocidos del eje Y . Por ejemplo los marcados en la Figura 3.24a son:

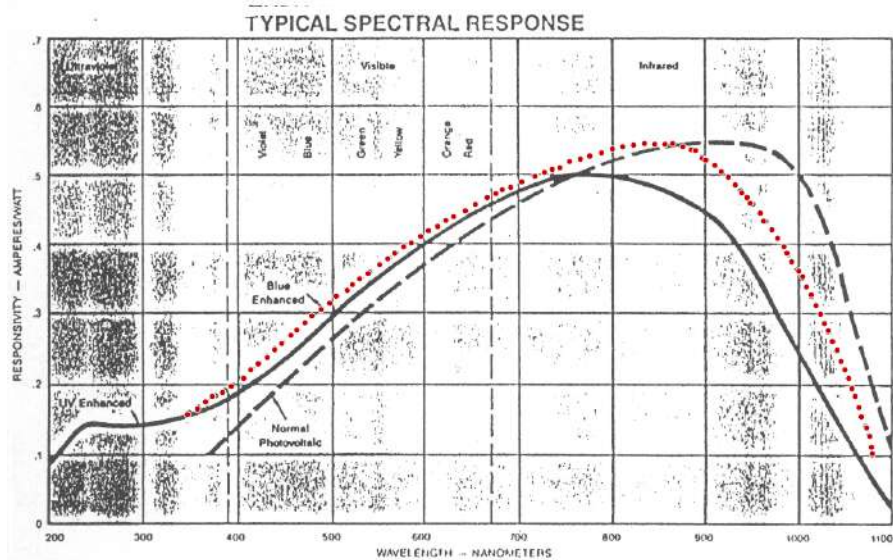
- Eje X: $0 \Rightarrow 1100$
- Eje Y: $0.1 \Rightarrow 0.7$

Cuanto mayor sea la distancia existente entre los dos puntos del mismo eje, menor será el error final, por lo que conviene que los puntos sean los extremos.

4. Una vez fijados los cuatro puntos, se presiona el botón “Complete!” y se abre una ventana donde se introducen los datos para cada punto. Si la calibración de los cuatro puntos resulta errónea, se pueden volver a fijar en cualquier momento desde la opción: “*Axes* \rightarrow *CalibrateAxes*”
5. El siguiente paso es seleccionar todos los valores de la gráfica a digitalizar. Se van seleccionando con el ratón clic tras clic hasta completar la gráfica, como se puede ver en la Figura 3.24b
6. Una vez fijados todos, se exportan los valores digitalizados en el formato apropiado, como se puede ver en la Figura 3.24c



(A) Paso 3



(B) Paso 5

Acquired Data

Dataset: Default Dataset ▾

Variables: X, Y

```

179.62201697802356, 0.15984753288095843
193.11060073496973, 0.16774105721705612
203.32614200528333, 0.17788284326045067
212.52190044986185, 0.185772178939432
225.8146938091648, 0.19141430007539573
237.05512970874872, 0.20043143168300237
253.4079961464355, 0.21170520231213874
262.59616458630035, 0.22409734439138806
272.3026793443356, 0.2325500544525425
284.0537823573763, 0.24213056044232217
293.7564575130548, 0.25203467370361057
302.9494254558656, 0.26241256178269246
314.6976487671387, 0.27368162017257264
322.8702423836252, 0.28156990868727483
333.08550445393877, 0.2917116947306693
342.2775124961604, 0.3018524336007847
354.54120242383624, 0.3108706123815704

```

Select All Download .CSV Graph in Plotly® Close

Sort
Sort by: Raw ▾
Order: Ascending ▾

Format
Number Formatting:
Digits: 5 Ignore ▾
Column Separator: , Format

*Plotly is a secure data analysis and graphing site with data sharing and access controls.
Visit <https://plot.ly> for details.

(C) Paso 6

FIGURA 3.24: Pasos seguidos en la digitalización

Una vez exportados los datos en el formato necesario, se coloca el fichero de datos resultante en la carpeta correspondiente. También es necesario que se le añada una cabecera con el nombre del fotodiodo, precedido del símbolo “#” para que *GNUPLOT* la desprecie. Esta cabecera se añade porque el software la utiliza cuando se realiza un análisis para determinar el fotodiodo con el que se ha realizado dicho análisis.

Si el software del analizador se ha instalado mediante el instalador, la carpeta correspondiente a las calibraciones ya contiene la calibración correspondiente del fotodiodo *SI-440*.

La curva de responsividad final generada se puede ver en la Figura 3.10.

En el Código 3.1, se puede observar parte del fichero correspondiente con los valores de responsividad. Como se ve en el mismo código, la cabecera contiene “#SI-440” que corresponde con el fotodiodo utilizado, y le preceden los datos en dos columnas, correspondientes con longitud de onda y responsividad respectivamente.

```
1 #SI-440
2 349.58 0.15852082
3 359.61 0.16646458
4 367.97 0.176666583
5 377.99 0.184610343
6 388.02 0.192554103
7 396.38 0.200493662
8 407.24 0.210701967
9 417.27 0.223170614
10 423.96 0.232237193
11 433.15 0.242441296
12 440.67 0.252641198
13 449.03 0.2628432
14 457.38 0.271913981
15 464.07 0.279849338
16 474.09 0.290055542
17 482.45 0.301388766
18 491.64 0.310461648
19 499.16 0.319530328
20 508.36 0.328603209
```

CÓDIGO 3.1: Parte del fichero de responsividad

3.3. Permisos para la comunicación con el microcontrolador

Para poder realizar la comunicación con el microcontrolador, es necesario establecer la comunicación a través del puerto USB. En particular, en el caso del software de control, está configurado para la comunicación con el USB0 (`/dev/ttyUSB0`).

Para poder abrir esta comunicación se necesitan derechos de administrador, por lo que se proponen las siguientes opciones:

- Ejecutar el programa con derechos de administrador desde el terminal: `sudo ./"NombreDelPrograma"`
- Proporcionar derechos de apertura del gestor de dispositivos *UDEV*, añadiendo una regla para el USB sobre el microcontrolador. Esto se realiza modificando el

fichero de reglas que se encuentra en la carpeta `/etc/udev/rules.d`

Si se modifica dicho fichero y se añade la línea de texto que se muestra a continuación, se añaden permisos para que no sea necesario proporcionar derechos de administrador cada vez que se quiera ejecutar el programa. Esto resulta en un software de mayor comodidad.

Para añadir la regla de forma manual, se deben seguir los siguientes pasos:

- Crear fichero en la carpeta: `/etc/udev/rules.d`
- Asignarle el nombre: `40-persistent-ftdi.rules`
- Incluir como contenido la siguiente línea:
`ATTRS{idVendor}=="0403", ATTRS{idProduct}=="6001", MODE="0666",
GROUP="users"`

Por otro lado, si la instalación del software se realiza mediante el instalador, estos tres pasos no serán necesarios. Una vez ejecutado el instalador, éste ejecuta un script que se encarga de añadir las reglas. Por lo tanto se ofrece un software más sencillo, evitando al usuario el conocimiento de las mismas.

3.4. Instalador del programa

Con la intención de facilitar el proceso de utilización del software, se ha creado un instalador para *UBUNTU* [20]. Este instalador se encarga de preparar el programa para su utilización inmediata, de forma que el usuario realice el mínimo número de tareas. Para ello, el instalador realiza los siguientes procedimientos:

- Detecta archivos antiguos del mismo tipo y los elimina, tarea necesaria sobre todo cuando se actualiza el software
- Descomprime los archivos necesarios para la instalación en una carpeta temporal
- Copia los archivos de la carpeta temporal a la carpeta destino del programa, en este caso, situada en: `/opt/SpectralScanner`
- Copia el icono que se va a utilizar para el programa en: `/usr/share/icons/`
- Añade las reglas para los permisos de comunicación con el USB vistos en el apartado anterior 3.3
- Crea el ejecutable desde el inicio en la carpeta correspondiente:
`/usr/share/applications/SpectralScanner.desktop`
Así, para encontrar el programa de fácilmente, se puede utilizar el buscador de *UBUNTU* (Figura 3.25). Una vez ejecutado el programa, se puede anclar el programa al inicio (icono inferior de la Figura 3.26) para tener el programa siempre a mano

- Como último paso el instalador se encarga de otorgar los permisos necesarios a los archivos y ficheros que se van a utilizar

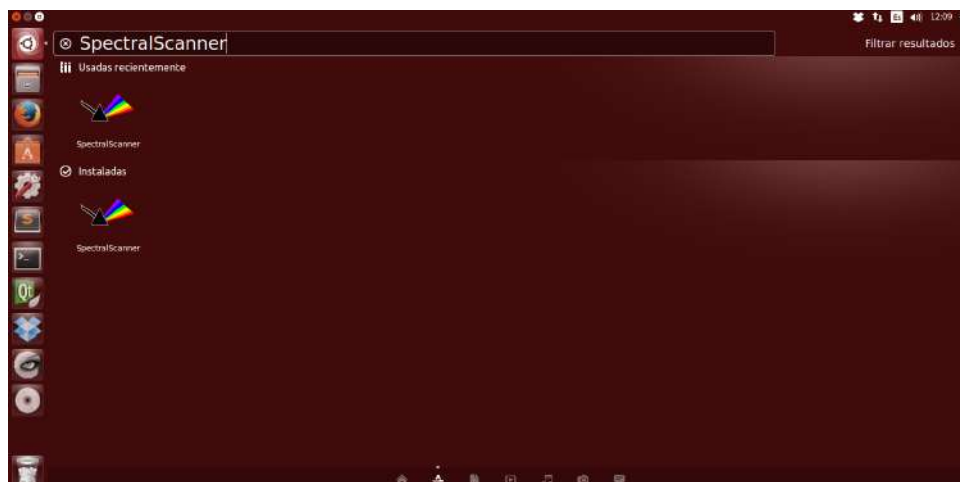


FIGURA 3.25: Buscador de UBUNTU para el software



FIGURA 3.26: Programa anclado al inicio de UBUNTU

Para poder realizar todas las acciones de instalación, es necesario tener permisos administrativos en la máquina en la que se instale el programa, por lo que se necesita conocer la contraseña de *sudo*.

Dentro de la carpeta "Software" (que se adjunta con el trabajo), se encuentra el *Read-me.txt* con las instrucciones de instalación. No obstante, los pasos para instalar el software mediante línea de comandos son los siguientes:

- Abrir un terminal
- Situar en la carpeta donde se encuentra el ejecutable. Para ello:
`cd "/ruta/carpeta/Software"`

- Escribir: `sudo sh Installation.sh`

Tras realizar los pasos descritos y presionar *enter*, se empieza a ejecutar el programa (*shell bash*), encargado de la instalación del software. Tanto en la Figura 3.27 como en la Figura 3.28, se pueden ver dos pasos de la instalación en la que el instalador notifica el estado de la instalación al usuario.

Una vez finalizada la instalación, para ejecutar el programa, es tan sencillo como abrir el buscador de programas de *UBUNTU* y escribir “SpectralScanner”. La aplicación aparece como se puede ver en la Figura 3.25.

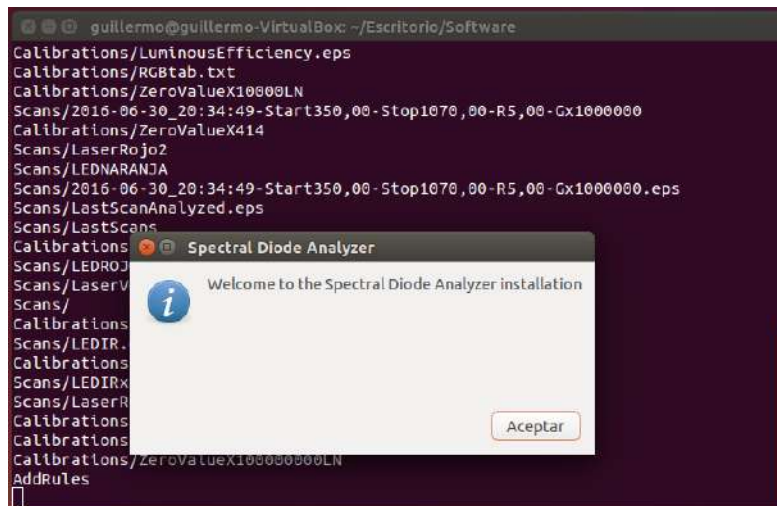


FIGURA 3.27: Ventana de bienvenida al proceso de instalación

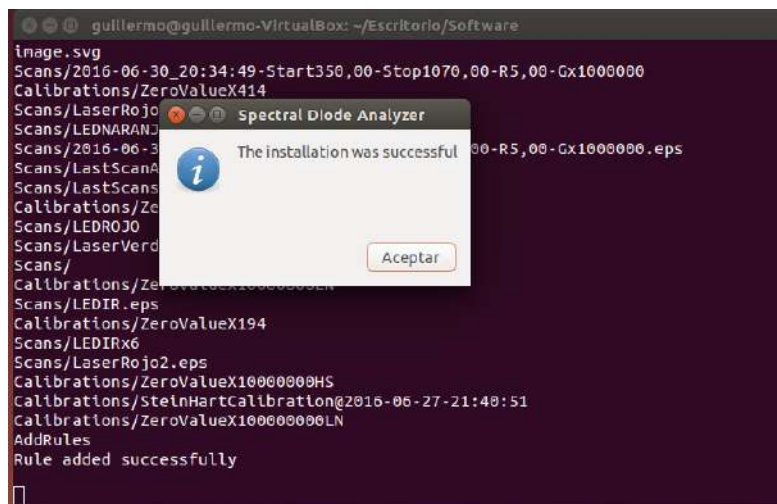


FIGURA 3.28: Ventana de proceso de instalación finalizado

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1. Análisis sobre el diseño eléctrico

Una vez realizado el diseño eléctrico, tras su fabricación y correspondiente montaje, se ha detectado un error en la etapa de entrada del sistema. Esto ha sido debido a un punto de vista erróneo de la posición del fotodiodo del monocromador.

El error se ha dado por la confusión que plantea el amplificador de corriente *HMS564*. En sus hojas de especificaciones, se puede apreciar que el fotodiodo inyecta corriente sobre el amplificador de entrada. En la Figura A.41, se observa que el fotodiodo se encuentra conectado por la parte interna del coaxial con el ánodo y por la parte externa con el cátodo.

En el fotodiodo del monocromador *SI-440* no se respeta esta conexión debido a que su conexión es justo a la inversa. Por lo tanto, el diseño realizado no responde correctamente para las corrientes generadas por el fotodiodo.

En definitiva, el fotodiodo *SI-440* tiene conectado su lado P (ánodo) a la malla y su lado N (cátodo) al centro del cable coaxial; por lo que es justo al revés de como se plantea en la figura del amplificador de corriente. La Figura 4.1 representa la conexión correcta que se debería seguir.

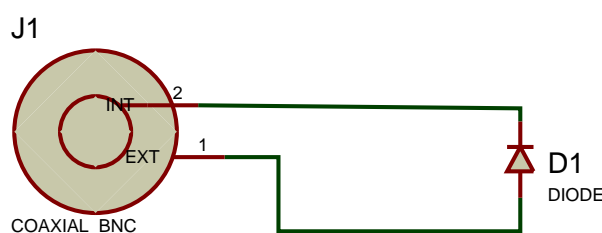


FIGURA 4.1: Conexión correcta con el fotodiodo

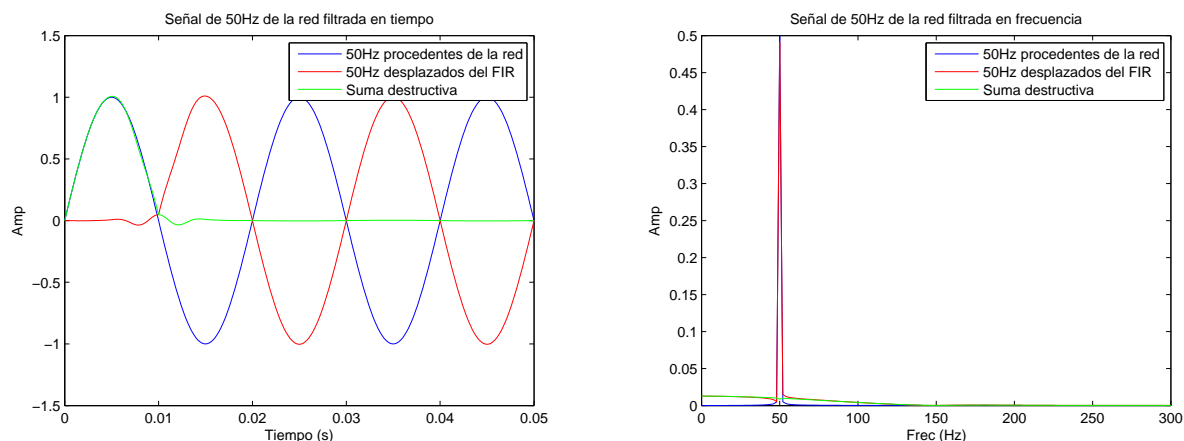
Para solventar este problema, se ha soldado un nuevo cable que invierta los terminales de la conexión que sale del fotodiodo. De esta forma, la parte interna pasa a formar parte de la malla y la parte externa corresponde con la señal.

No es una solución muy apropiada, ya que introduce ruido en el sistema, pero ha sido la decisión adoptada.

A la hora de realizar los análisis, se apreciaban perfectamente los 50 Hz de la red eléctrica captados por el cable. Para evitar este problema de compatibilidad electromagnética, se ha implementado un filtro digital una vez realizada la conversión analógico a digital.

Un filtro interesante para este tipo de señales, es un filtro “Notch” hardware. Este filtro electrónico precisa de un filtro paso bajo y un filtro paso alto para eliminar la señal de 50 Hz. Como el problema se ha detectado una vez montada la PCB y en proceso de análisis, esta solución no ha sido viable y, por lo tanto, dicho filtro queda descartado. En su lugar, se ha elegido un filtro “comb” (o peine) porque se trata de un filtro digital y no se necesita realizar ningún cambio en el diseño, y además no supone problemas. En este tipo de filtros, la señal obtenida del convertidor se suma con una versión retrasada de sí misma. De esta forma se producen interferencias constructivas y destructivas simultáneamente. Bajo este supuesto, se realiza un muestreo de forma que las muestras se tomen en múltiplos de 50 Hz, consiguiendo así que la propia señal de la red eléctrica (50 Hz) y sus múltiplos, queden situadas justo en la zona de valles del filtro implementado.

El filtro implementado, responde de igual forma que el de la Figura 4.2a. En ella se puede ver una señal sinusoidal (azul), que hace referencia a la señal de la red eléctrica captada por el cable. Así mismo, se puede ver la señal desplazada por un filtro FIR (rojo) y la señal correspondiente a la suma destructiva de ambas (verde). Si se representa en el dominio de la frecuencia (Figura 4.2b), se puede ver cómo la banda de los 50 Hz de la señal resultante (verde), desaparece quedando limpia la interferencia de la señal.



(A) Representación en tiempo de la eliminación de los 50 Hz de la red (B) Representación en frecuencia de la eliminación de los 50 Hz de la red

FIGURA 4.2: Filtro FIR

Sin embargo, tras la solución software, se plantea para un futuro la idea de rediseñar la etapa de acondicionamiento de entrada, para adaptar mejor la entrada del fotodiodo. Esto implica la colocación de un cable coaxial “normal” de forma que la señal se transmita por el centro del cable y la malla se encargue de aislar las interferencias.

De este modo, es necesario volver a diseñar el amplificador de ganancia programable de la entrada así como el acondicionamiento de entrada propuesto para el HMS564 de la siguiente manera:

- **PGA:** Cambiar el sentido en el que se diseña la corriente, siendo en este caso saliente por el interior del coaxial y tierra en el exterior
- **HMS564:** Modificar el diseño para adaptar un rango de entradas de 0 V a 10 V y no de 0 V a -10 V como estaba propuesto

4.2. Análisis general de una fuente emisora de luz

La finalidad del proyecto, es la de ofrecer análisis sobre fuentes emisoras de luz. Cada vez que se presiona el botón *Start Scan* (menú de diodos LED, Figura 3.5), se realiza un análisis espectral, correspondiente a la fuente emisora de luz, que se encuentra en la rejilla de entrada del monocromador. Cuando finaliza el análisis, ofrece como resultado dos ventanas:

- Una de las ventanas ofrece el espectro de la fuente emisora de luz analizada
- La otra ventana, ofrece el análisis paramétrico en el caso de ser un diodo LED. En caso de ser otro tipo de fuente, el análisis no tiene significado ya que se calculan los parámetros en el caso de ser un diodo LED

A estos mismos resultados (ventana de espectro y análisis de parámetros), se puede llegar de igual manera, si se abre el análisis desde la pestaña de anteriores análisis (Apartado 3.1.2.2). Si se presiona el botón “*Analyze Scan*” se abren en nuevas ventanas, los resultados de los análisis seleccionados. Si el análisis se realiza mediante la pestaña “*Last Scans*”, se permite la selección de múltiples análisis. Entonces, el análisis espectral corresponde con una representación de cada uno de los espectros seleccionados en el mismo gráfico. Esto es útil a la hora de comparar las distintas curvas.

Para aprovechar al máximo el rango del eje Y (*Popt*) de todas las curvas, se acota el máximo de la curva de mayor potencia. Si se representan curvas cuyas potencias sean muy distintas, el resultado puede no ser el esperado. Es decir, si se escala la de mayor potencia, la de menor potencia puede llegar a ser tan pequeña que resulte inapreciable.

Otro de los aspectos que se ofrecen cuando se analiza un diodo, es la posibilidad de obtener la curva del espectro escalada al ojo humano. Tanto si se realiza un nuevo análisis como si se analiza uno ya realizado, el software se ha programado de tal forma que pregunta al usuario si desea visualizar la curva del espectro escalada al ojo humano. Si el usuario pulsa que sí (botón “YES”), se muestran dos gráficas; la de potencia óptica y la de potencia luminosa. Si por el contrario se pulsa el botón “NO”, solo se muestra la potencia óptica (a pesar de que también se calcule la luminosa para obtener sus parámetros).

Sea cual sea la manera de obtener el análisis (simple o múltiple), el software ofrece análisis paramétricos individuales, de cada uno de los análisis que se hayan seleccionado.

El análisis detecta los siguientes parámetros de forma automática:

- Longitud de onda de máxima emisión (pico de emisión del LED)
- Longitud de onda de máxima recepción por el ojo humano
- Energía del GAP de la zona activa(en electrón voltios)
- Anchura espectral (en nanómetros)
- Anchura espectral (en electrón voltios)
- Color del diodo
- Potencia óptica total (en todo el espectro analizado)
- Potencia luminosa total

Además ofrece, una caja para introducir la tensión de funcionamiento (V_F) para ampliar los datos analizados. Para ello, el modo de operar debe ser el siguiente:

1. Encender el LED con el botón “LED ON”
2. Ayudándose de un multímetro, medir la tensión de operación del diodo LED
3. Apagar el diodo LED para evitar su calentamiento y reducir en lo posible el consumo de potencia
4. Introducir en la caja proporcionada el valor medido
5. Presionar el botón “Reanalyze” para obtener datos que no se consiguen con un simple análisis espectral

Los parámetros calculados se podrán ver en las correspondientes figuras del análisis de cada diodo.

4.2.1. Diodo Infrarrojo

El diodo infrarrojo analizado es el *SFH 4516 de OSRAM*. Éste corresponde con un diodo infrarrojo de *GaAs* de 950 nm de emisión de pico.

El espectro obtenido tras realizar el análisis, es el que se puede observar en la Figura 4.3. En esta figura, se puede ver claramente el espectro de emisión. El análisis de parámetros, ofrece datos relevantes muy interesantes en este caso. Estos datos se pueden ver en la Figura 4.4. No obstante, se detallan estos datos a continuación:

- Longitud de onda de emisión de pico de 948 nm. Por lo tanto, este diodo emite en el límite superior de emisión para la primera ventana de comunicaciones ópticas
- Longitud de onda de pico de visión de 0 nm. En este caso, es interesante destacar, que el ojo humano no detecta el infrarrojo. Por esto mismo, al analizar este diodo, tanto la longitud de onda pico de visión como la potencia o flujo luminoso son cero
- Energía del GAP de 1.32 eV
- Anchura espectral de 49.43 nm (razonable para un diodo led)

- Color: Infrarrojo y perteneciente al rango de la primera ventana de comunicaciones ópticas
- Potencia óptica total de 0.16 mW
- Flujo luminoso de valor cero por la sensibilidad del ojo

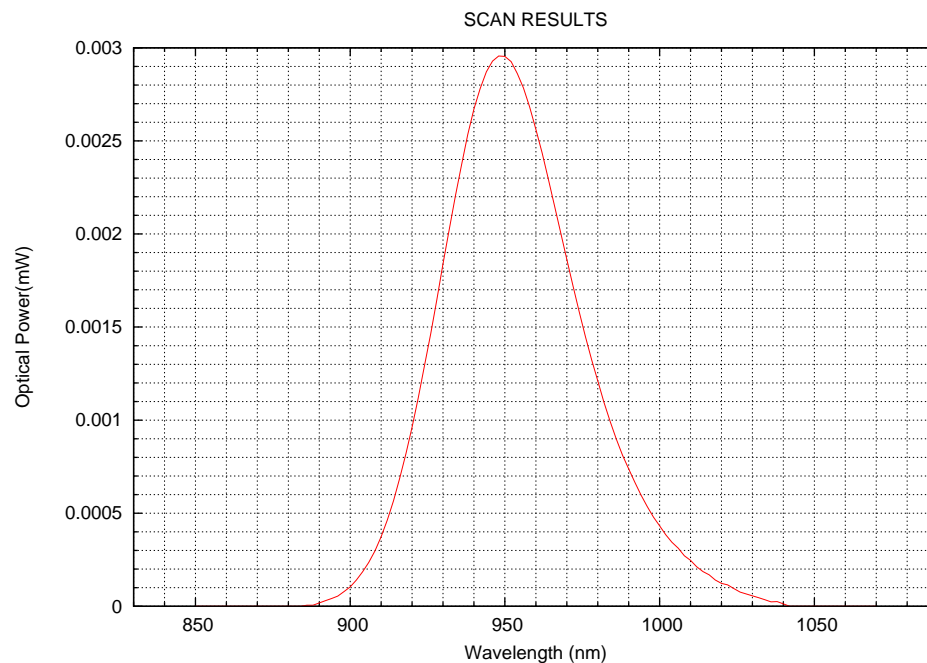


FIGURA 4.3: Análisis espectral del diodo infrarrojo

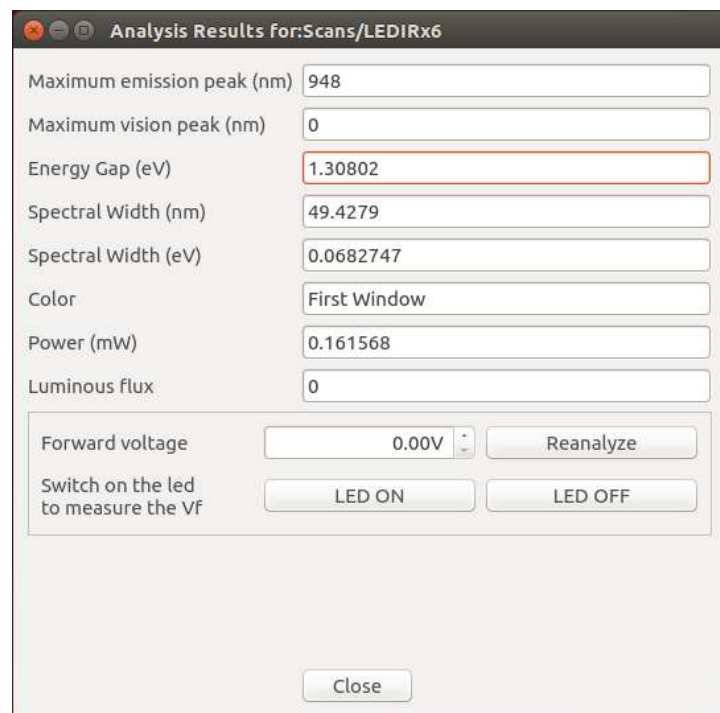


FIGURA 4.4: Análisis paramétrico del diodo infrarrojo

Las características originales, proporcionadas por el fabricante del diodo, corresponden con las siguientes:

- Longitud de onda de emisión (λ_{peak}): 950 nm
- Anchura espectral ($\Delta\lambda$): 55 nm

Una vez vistas las características originales proporcionadas por el fabricante, se puede comprobar que la diferencia no es muy significativa al original. Estos errores, comprenden, un error en longitud de emisión de 2 nm y un error en anchura espectral de 5.57 nm. En la Figura 4.5 se puede ver el espectro de emisión proporcionado por el fabricante.

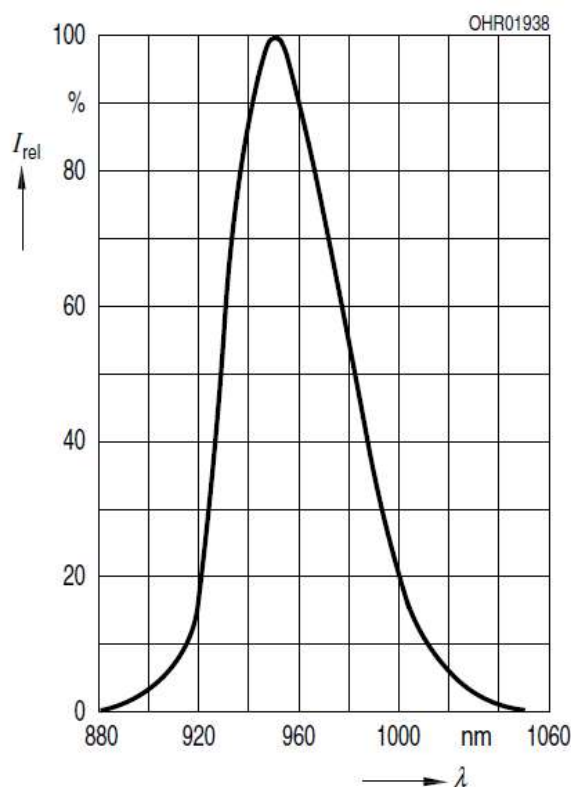


FIGURA 4.5: Espectro original del diodo infrarrojo

4.2.2. Diodo Rojo

El diodo rojo analizado es el *HLMP-3750* de *AVAGO*. Éste corresponde con un diodo rojo de *GaAsP/GaP* de 635 nm de emisión de pico.

El espectro obtenido tras realizar el análisis, se puede observar en la Figura 4.6. En este caso, como el diodo analizado es de color rojo y el ojo humano sí que es sensible a esa longitud de onda, ni el flujo radiante ni el pico de emisión visible son cero. Se puede ver el análisis realizado en la Figura 4.7. No obstante, los datos obtenidos del análisis, se detallan a continuación:

- Longitud de onda de emisión de pico de 634 nm

- Longitud de onda de pico de visión de 630 nm. Como se puede ver en la Figura 3.15, la respuesta del ojo en la longitud de onda del color rojo, decae con el incremento de la longitud de onda. Por este motivo, el máximo de emisión visible por el ojo humano, es de aproximadamente 630 nm. En todo caso sigue siendo de color rojizo, como se puede comprobar cuando se enciende el LED
- Energía del GAP de 1.95 eV
- Anchura espectral de 42.28 nm (algo menor que en el caso del LED infrarrojo)
- Color: Predominantemente rojo
- Potencia óptica total de 0.034 696 mW. La potencia óptica de este diodo es casi cinco veces menor que en el caso del infrarrojo. Esto se debe a la peor eficiencia del diodo sumado a su mayor tensión umbral de funcionamiento
- Flujo luminoso de 0.0064 lm. En este caso el flujo radiante es menor que la potencia óptica debido a su peor eficiencia en el ojo humano

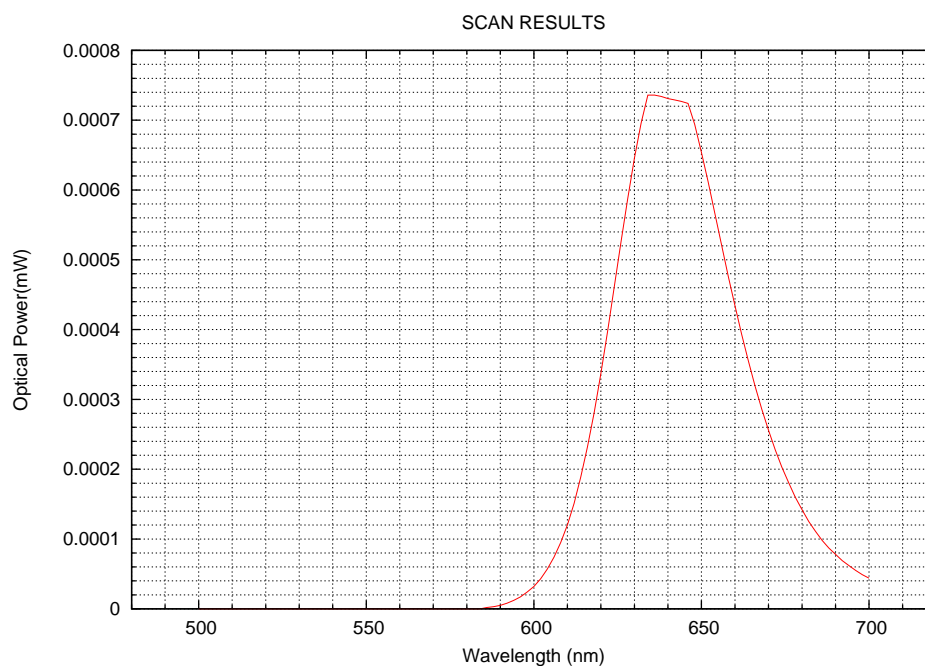


FIGURA 4.6: Análisis espectral del diodo rojo

Parameter	Value
Maximum emission peak (nm)	634
Maximum vision peak (nm)	630
Energy Gap (eV)	1.95584
Spectral Width (nm)	42.2825
Spectral Width (eV)	0.130583
Color	Red
Power (mW)	0.034696
Luminous flux	0.00640421

Forward voltage: 0.00V [Reanalyze]

Switch on the led to measure the Vf: [LED ON] [LED OFF]

[Close]

FIGURA 4.7: Análisis paramétrico del diodo rojo

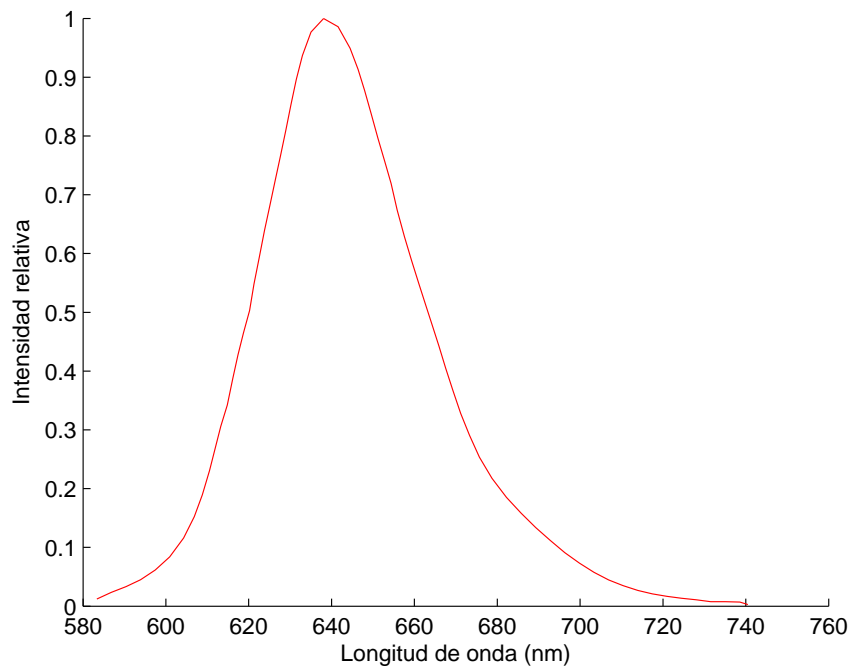
Las características originales, proporcionadas por el fabricante del diodo, corresponden con las siguientes:

- Longitud de onda de emisión (λ_{peak}): 635 nm
- Longitud de onda dominante (λ_d): 626 nm
- Anchura espectral ($\Delta\lambda_{3/4}$): 40 nm

Los errores que derivan de las características originales son los siguientes:

- Error de 1 nm de longitud de onda. Posiblemente provocado por falta de resolución o saturación del máximo
- Error de 4 nm de longitud de onda dominante
- Error en anchura espectral no comparable ya que están proporcionando la anchura de 3/4 y no la mitad

En la Figura 4.8 se puede ver el espectro de emisión proporcionado por el fabricante.

FIGURA 4.8: Espectro original del diodo rojo (*HLMP-3750 de AVAGO*)

4.2.3. Diodo Amarillo

El diodo amarillo analizado es el *HLMP-3850 de AVAGO*. Éste corresponde con un diodo amarillo de *GaAsP/GaP* de 583 nm de emisión de pico.

El espectro obtenido tras realizar el análisis, es el que se puede observar en la Figura 4.9. Por otro lado, en la Figura 4.10, se pueden ver los resultados del análisis de parámetros. En el caso de este diodo, su color en el laboratorio puede llevar a la confusión, por el hecho de que su longitud de onda es muy próxima al color naranja (590 nm) y a simple vista lo parece. Sin embargo, el rango de longitudes de onda al que pertenece está catalogado como amarillo.

Los datos obtenidos del análisis paramétrico de este diodo son los siguientes:

- Longitud de onda de emisión de pico de 587 nm
- Longitud de onda de pico de visión de 584 nm
- Energía del GAP de 2.11 eV
- Anchura espectral de 32.91 nm
- Color: longitud de onda del amarillo (próximo al naranja)
- Potencia óptica total de 0.005 832 mW
- Flujo luminoso de 0.004 312 47 lm. En este caso el flujo radiante es parecido pero menor. La longitud de onda es más cercana al verde, por lo que hay menor diferencia

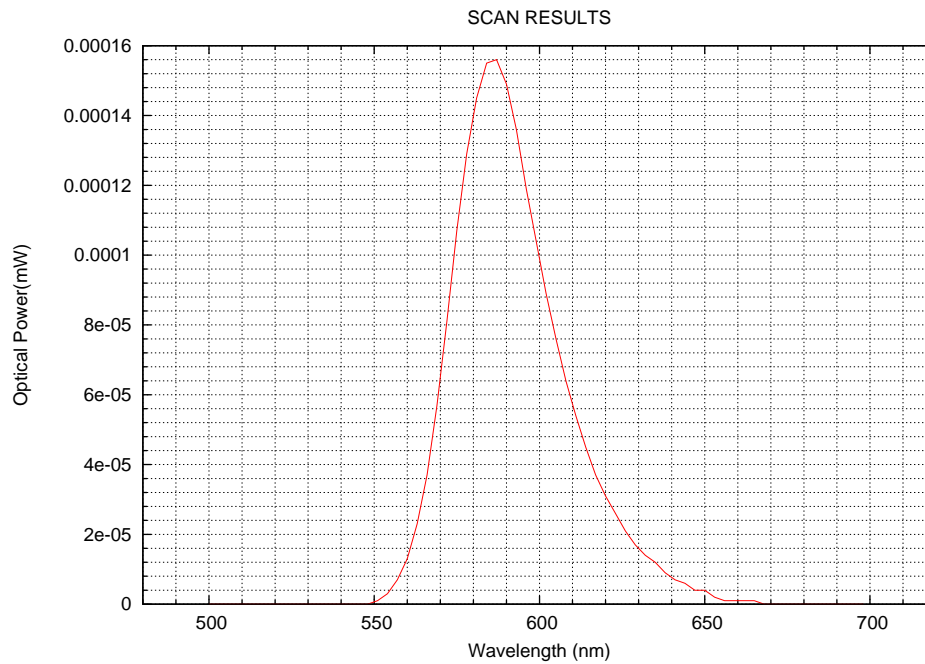


FIGURA 4.9: Análisis espectral del diodo amarillo

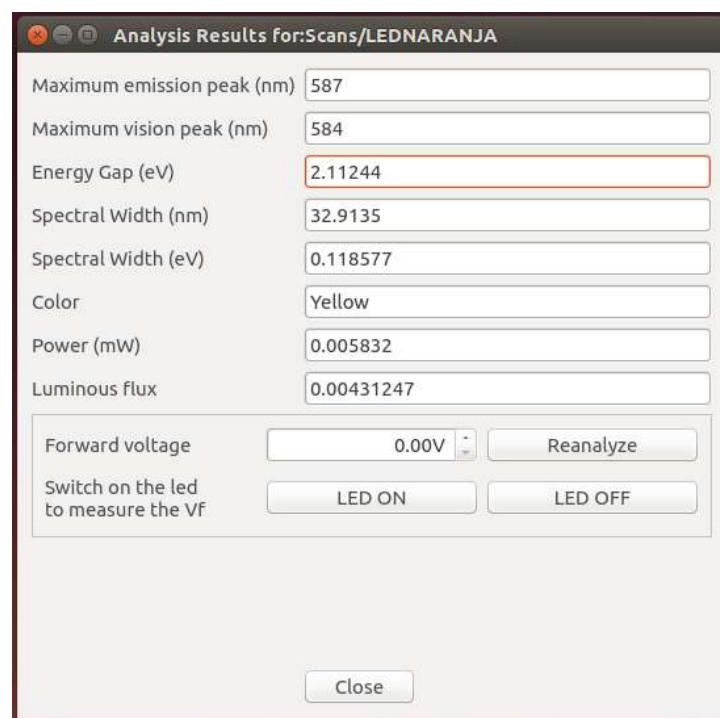


FIGURA 4.10: Análisis paramétrico del diodo amarillo

Las características originales, proporcionadas por el fabricante del diodo, corresponden con las siguientes:

- Longitud de onda de emisión (λ_{peak}): 583 nm
- Longitud de onda dominante (λ_d): 585 nm

- Anchura espectral ($\Delta\lambda_{3/4}$): 36 nm

Los errores que derivan de las características originales son los siguientes:

- Error de 4 nm de longitud de onda.
- Error de 1 nm de longitud de onda dominante
- Error en anchura espectral no comparable ya que están proporcionando la anchura de 3/4 y no la mitad

En la Figura 4.11 se puede ver el espectro de emisión proporcionado por el fabricante.

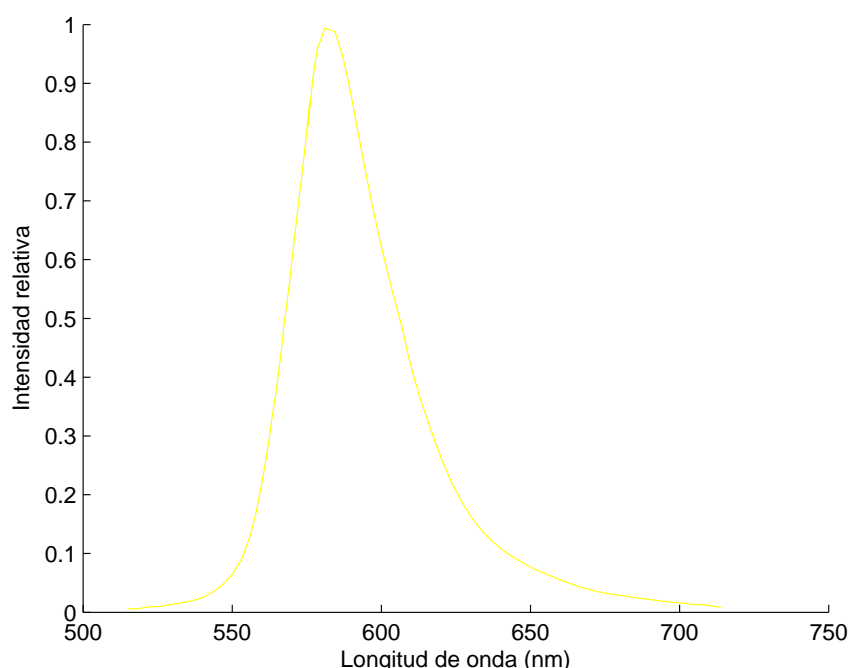


FIGURA 4.11: Espectro original del diodo amarillo (*HLMP-3850 de AVAGO*)

4.2.4. Diodo Verde

El diodo amarillo analizado es el *HLMP-3950 de AVAGO*. Éste corresponde con un diodo verde de *GaAsP/GaP* de 565 nm de emisión de pico.

La Figura 4.12 representa el espectro obtenido tras realizar el análisis. Por otro lado, en la Figura 4.13, se pueden ver los resultados del análisis.

El aspecto más interesante de este diodo es la respuesta al ojo humano. Como el ojo tiene una eficiencia máxima en estas longitudes de onda, la longitud de emisión máxima coincide con la máxima del pico de visión. Así mismo, la potencia óptica es ligeramente inferior al flujo luminoso.

Los datos obtenidos del análisis paramétrico de este diodo son los siguientes:

- Longitud de onda de emisión de pico de 566 nm
- Longitud de onda de pico de visión de 566 nm
- Energía del GAP de 2.19 eV
- Anchura espectral de 30.77 nm (menor anchura espectral que todos los diodos LED analizados)
- Color: longitud de onda del verde
- Potencia óptica total de 0.008 457 mW
- Flujo luminoso de 0.007 572 lm. Aunque la potencia óptica del diodo es muy pequeña, no presenta un problema ya que son diodos que se ven muy bien

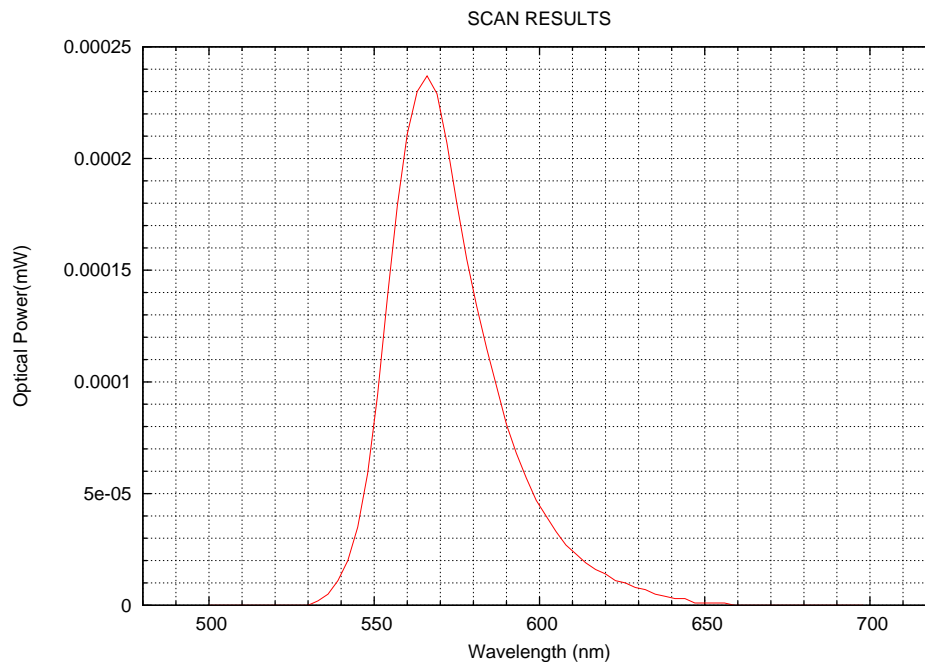


FIGURA 4.12: Análisis espectral del diodo verde

Parameter	Value
Maximum emission peak (nm)	566
Maximum vision peak (nm)	566
Energy Gap (eV)	2.19081
Spectral Width (nm)	30.7769
Spectral Width (eV)	0.119261
Color	Green
Power (mW)	0.008457
Luminous flux	0.00757247

Forward voltage: 0.00V [Reanalyze]

Switch on the led to measure the Vf: [LED ON] [LED OFF]

[Close]

FIGURA 4.13: Análisis paramétrico del diodo verde

Las características originales, proporcionadas por el fabricante del diodo, corresponden con las siguientes:

- Longitud de onda de emisión (λ_{peak}): 565 nm
- Longitud de onda dominante (λ_d): 569 nm
- Anchura espectral ($\Delta\lambda_{3/4}$): 28 nm

Los errores que derivan de las características originales son los siguientes:

- Error de 1 nm de longitud de onda.
- Error de 3 nm de longitud de onda dominante
- Error en anchura espectral no comparable ya que están proporcionando la anchura de 3/4 y no la mitad

En la Figura 4.14 se puede ver el espectro de emisión proporcionado por el fabricante.

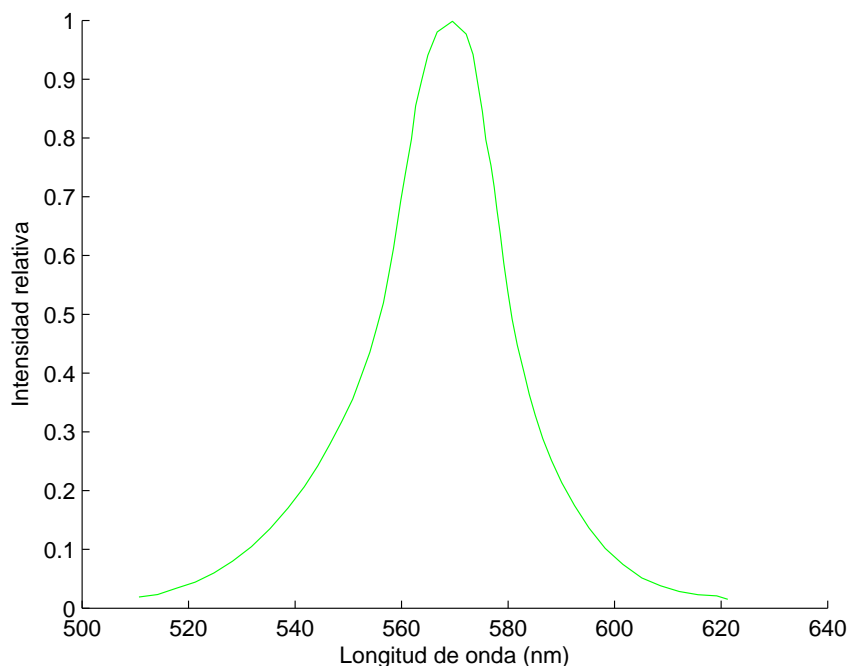


FIGURA 4.14: Espectro original del diodo verde (HLMP-3950 de AVAGO)

4.2.5. Led Blanco

El diodo LED de color blanco corresponde al flash de la cámara de un *Samsung Galaxy S4*.

Se trata de un diodo un tanto especial. El color blanco, en el caso de la luz, se obtiene de la composición de colores primarios. Este es uno de los motivos principales por los que se tardó tanto en desarrollar dicho LED. Desde los años 60, se fabricaban en masa diodos LED de colores cálidos, pero cualquier composición de estos colores nunca daría como resultado el color blanco. Hasta que no aparecieron los LED de color azul, no se pudieron fabricar los de color blanco.

El espectro del led blanco se puede ver en la Figura 4.15. Su espectro presenta dos máximos claramente diferenciados a lo largo de su longitud de onda. El primer máximo se encuentra en la longitud de onda de 435 nm, correspondiente al color violeta azulado. El siguiente máximo se encuentra en la longitud de onda de 570 nm, correspondiente al color verde amarillento. Si en la carta de colores se traza una recta que una los dos máximos de emisión, se puede ver que el color resultante será el blanco. La recta trazada se representa mediante la línea roja en la Figura 4.16.

En el espectro de la Figura 4.15, también se puede ver que presenta un cierto porcentaje de emisión en el rango infrarrojo.

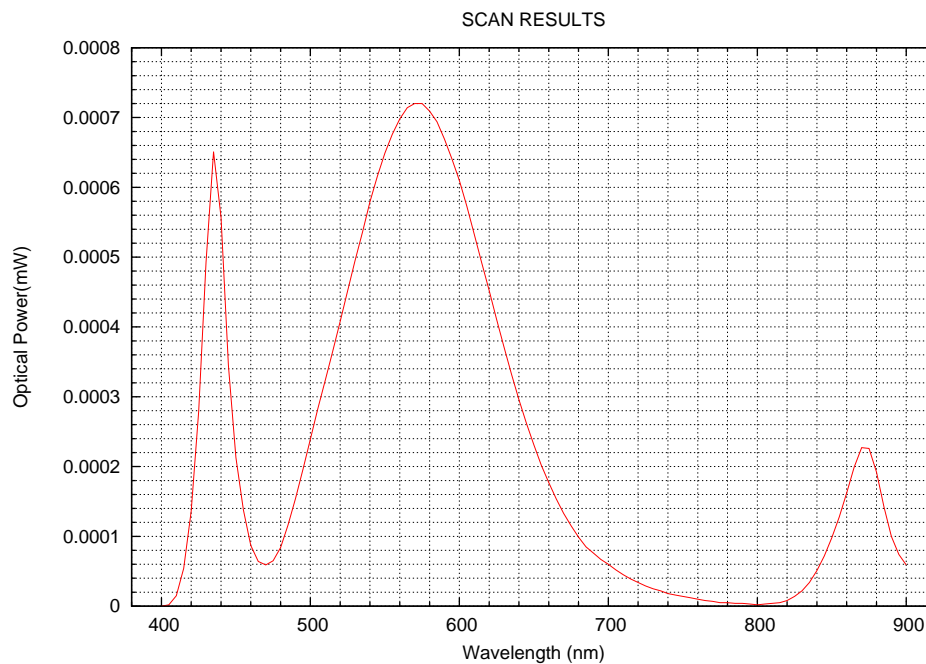


FIGURA 4.15: Análisis espectral de un diodo de luz blanca

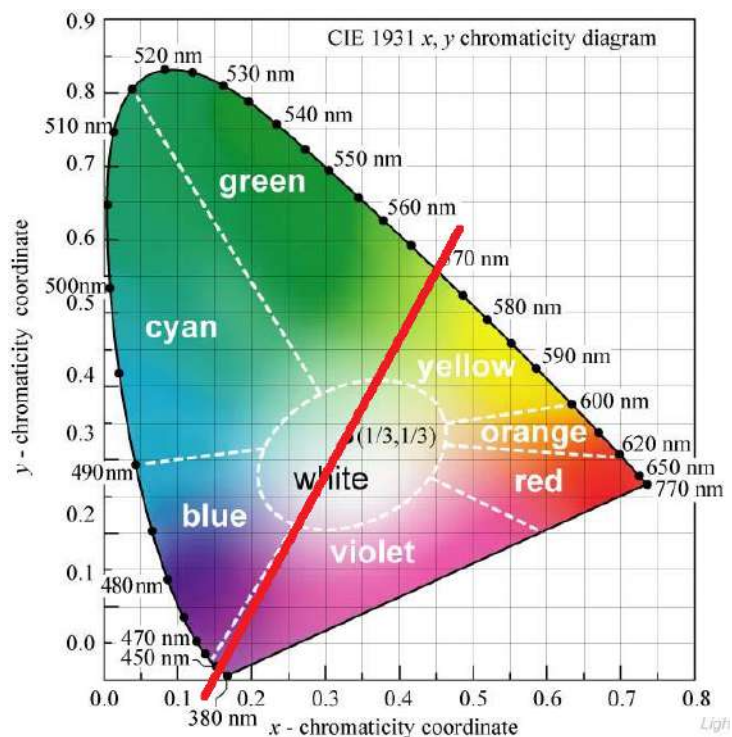


FIGURA 4.16: Carta cromática (CIE 1931) con los colores correspondientes a la mezcla del blanco

El análisis de los parámetros del LED blanco es un problema a nivel del software actual porque el color que se consigue analizar es el dominante de los colores posibles. Esto es así debido a la composición de colores del LED blanco. En este caso el color

verde amarillento es el dominante y, por lo tanto, el que el software detecta. En el apartado 6.2.5.2 de futuras ampliaciones, se describe un ejemplo de este problema. En la Figura 4.17 se puede ver el análisis de los parámetros obtenido por el software.

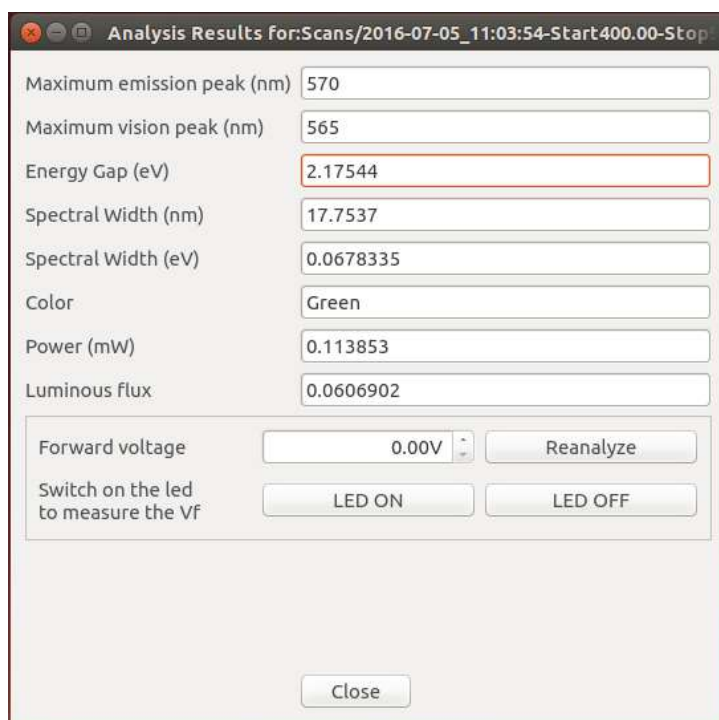


FIGURA 4.17: Análisis paramétrico del diodo blanco

A continuación, se procede a detallar alguno de los errores obtenidos que se aprecian en la figura anterior. Para empezar el color detectado por el análisis paramétrico es el verde. Esto es un error porque debería ser blanco. En segundo lugar, se aprecia un error en la energía del GAP, ya que el resultado obtenido está calculado como si el diodo de emisión fuese el de color verde y debería ser el violeta azulado. Para obtener el color blanco, se coloca una capa fluorescente de color amarillento sobre el diodo violeta azulado. La fluorescencia de la capa amarillenta está produciendo mayor potencia óptica que el propio diodo LED violeta, por lo que el software detecta esta capa fluorescente como si se tratase del diodo LED que emite, pese a no ser así. Por lo tanto, el LED sobre el que se debería calcular la energía de GAP es el violeta azulado, un LED de nitruros correspondiente con una energía de GAP mucho mayor de la obtenida.

4.2.6. Análisis múltiple

Como se comenta al principio del capítulo, el software de análisis de diodos ofrece la posibilidad de analizar de una sola vez varios diodos. El análisis paramétrico se presenta en ventanas individuales. Sin embargo, el análisis espectral representa los múltiples espectros en la misma gráfica. La Figura 4.18 representa el análisis espectral de los diodos analizados con los colores correspondientes a su longitud de onda, a excepción del infrarrojo que se representa con color negro.

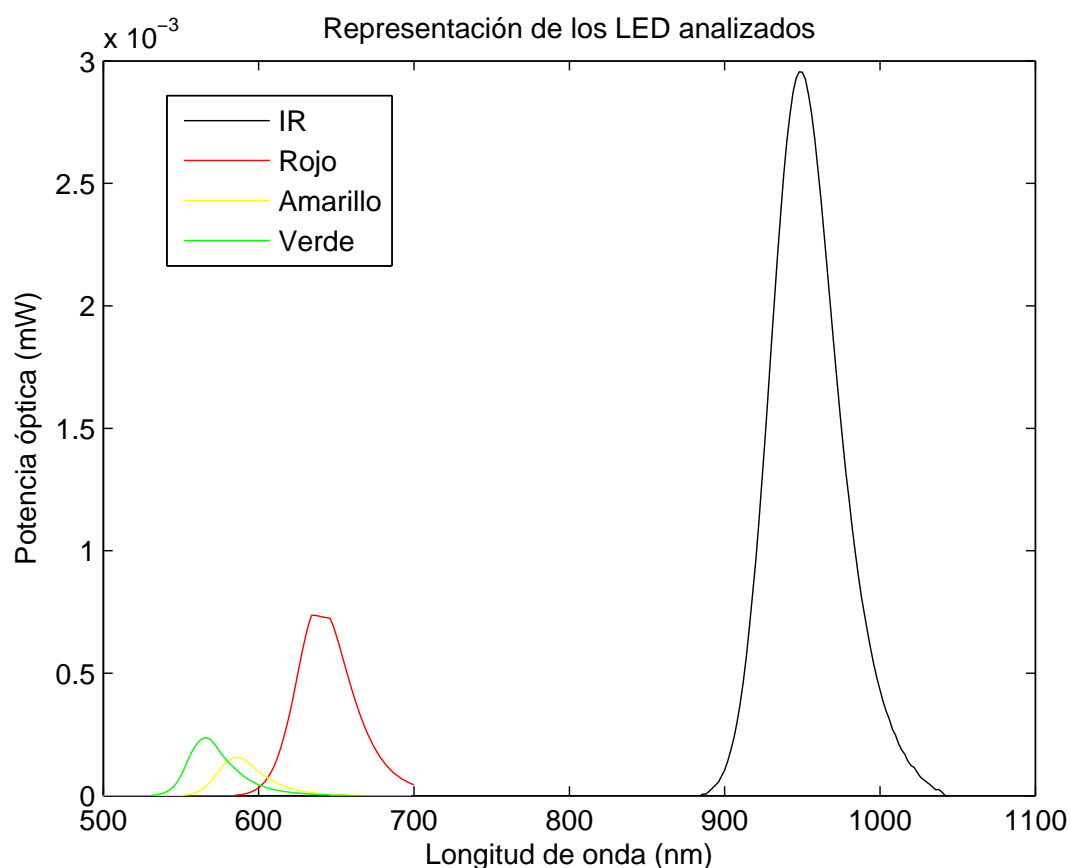


FIGURA 4.18: Análisis espectral múltiple

4.3. Análisis de láser

Únicamente se ha podido realizar la caracterización de dos diodos láser debido a la falta de control sobre el driver de diodos láser *LDD*, así como del controlador de temperatura *HTC*. Estos son:

- Puntero láser de color rojo (poca potencia)
- Láser de color verde (potencia media)

Los dos láser analizados no responden con el propósito final del dispositivo de caracterización óptica de diodos láser. Este dispositivo pretende utilizar el módulo de montaje de diodos *LDM* visto en el Capítulo A.6 y conseguir una caracterización total. Pese a no disponer del control total de estos elementos, se ha realizado el análisis espectral de los dos diodos láser (con encendido manual).

4.3.1. Láser Rojo

En la Figura 4.19 se puede ver el espectro del láser analizado. Uno de los parámetros más notables a simple vista es la anchura espectral del diodo láser. La anchura espectral de un diodo láser es mucho menor que la de un diodo LED normal, ya que

los fotones se emiten de forma coherente.

Al ser el láser de un puntero, no tiene excesiva potencia. A pesar de ello, al tener una anchura espectral pequeña, toda su potencia se concentra en la longitud de onda de emisión.

Los parámetros analizados de este láser se pueden ver en la Figura 4.20.

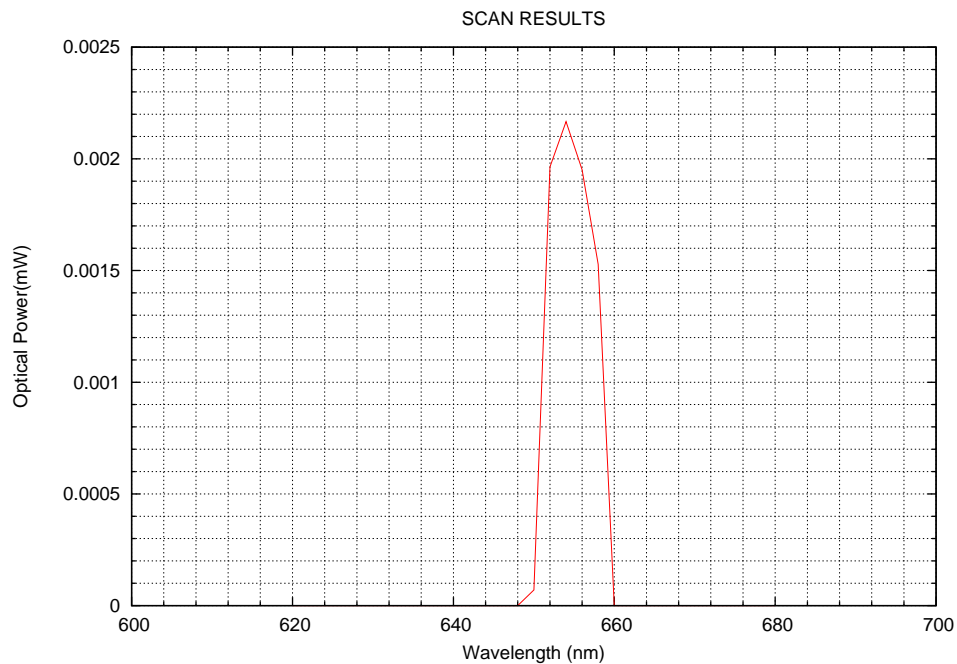


FIGURA 4.19: Análisis espectral del diodo láser rojo

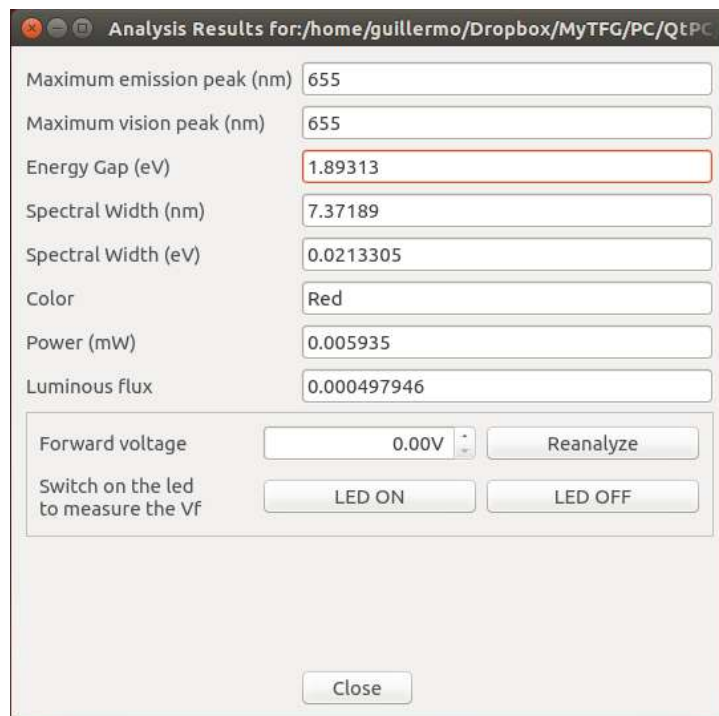


FIGURA 4.20: Análisis paramétrico del diodo láser rojo

4.3.2. Láser Verde

El láser verde utilizado para el análisis es un láser de 532 nm. Aparenta ser un láser de Neodimio YAG (Nd-YAG). Éstos tienen una longitud de emisión es de 1064 nm, al que se le añade un doblador de frecuencia obteniendo finalmente una longitud de onda de 532 nm.

En la Figura 4.22 se puede ver el análisis paramétrico del diodo láser. La potencia de este láser es mucho mayor que en el caso del láser rojo. Por el contrario, la anchura espectral es parecida y razonable para un diodo láser.

En la Figura 4.21 se puede ver el espectro obtenido en el análisis de este último diodo láser.

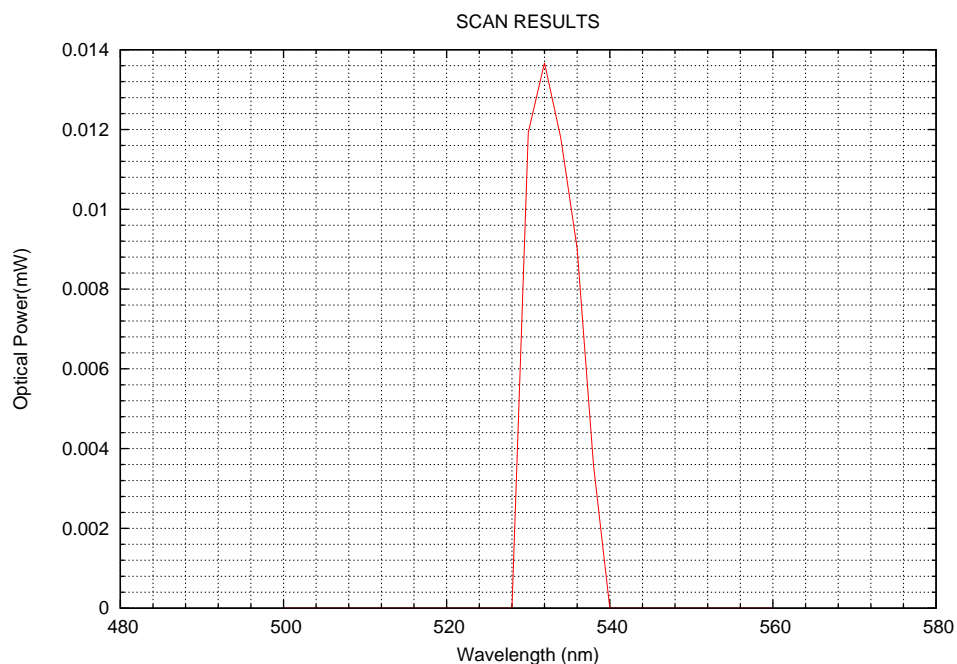


FIGURA 4.21: Análisis espectral del diodo láser verde

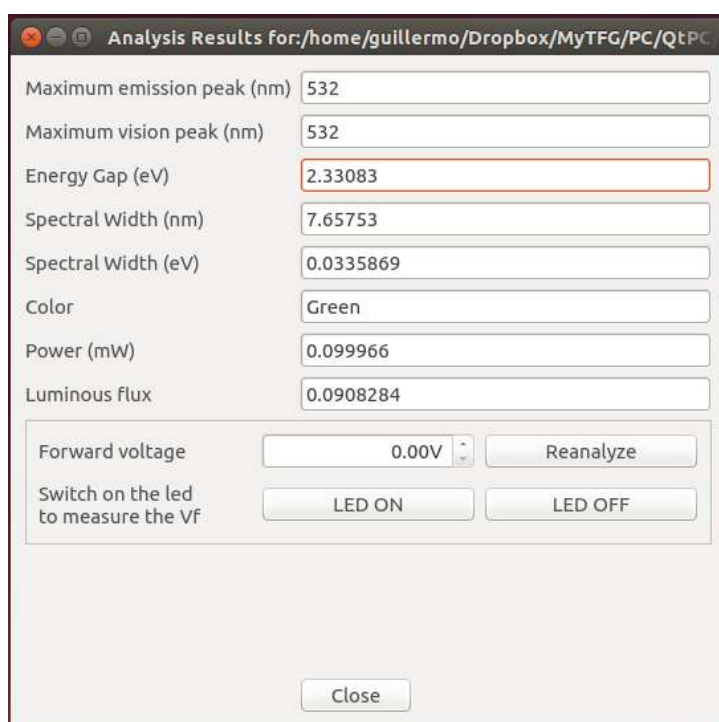


FIGURA 4.22: Análisis paramétrico del diodo láser verde

La diferencia de potencia entre el diodo láser verde y el rojo, se puede ver en la Figura 4.23 en la que se representa el análisis espectral de potencia de ambos diodos láser en una misma gráfica.

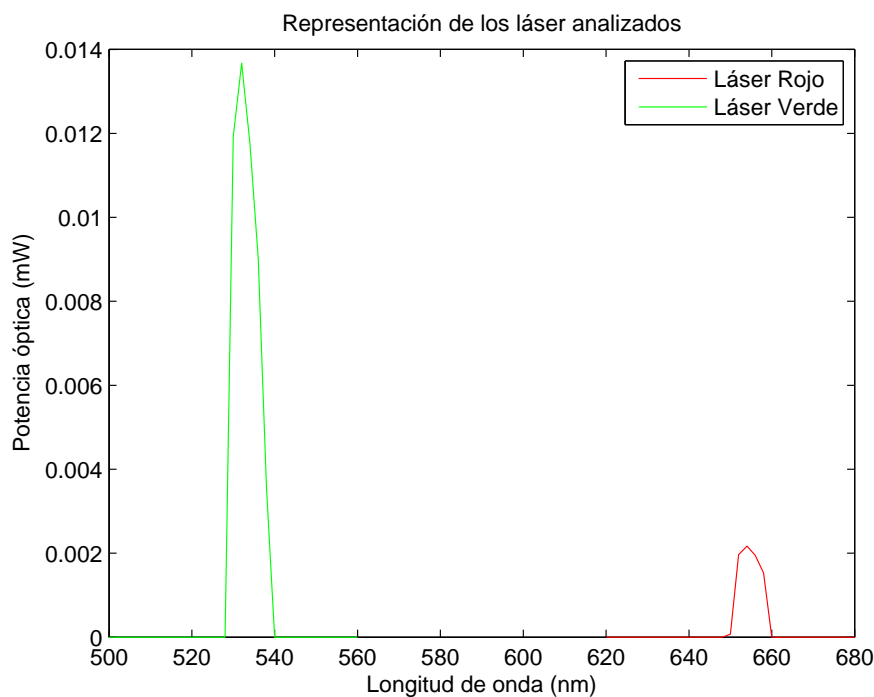


FIGURA 4.23: Análisis espectral de los láser rojo y verde

Con el objetivo de visualizar la diferencia entre las anchuras espectrales y la diferencia de potencias tanto de los diodos láser como de los diodos LED, en la Figura 4.24 se muestra el análisis espectral. En la figura se puede apreciar que efectivamente el diodo láser verde es el que mayor potencia emite¹.

¹Pese a todo, se pudo comprobar que por problemas de direccionalidad, el láser verde no se situó de forma correcta durante el análisis. El espectro resultante, fue el reflejo de su emisión. El láser verde en emisión directa, supera la curva analizada e incluso satura el amplificador externo en su mínima ganancia.

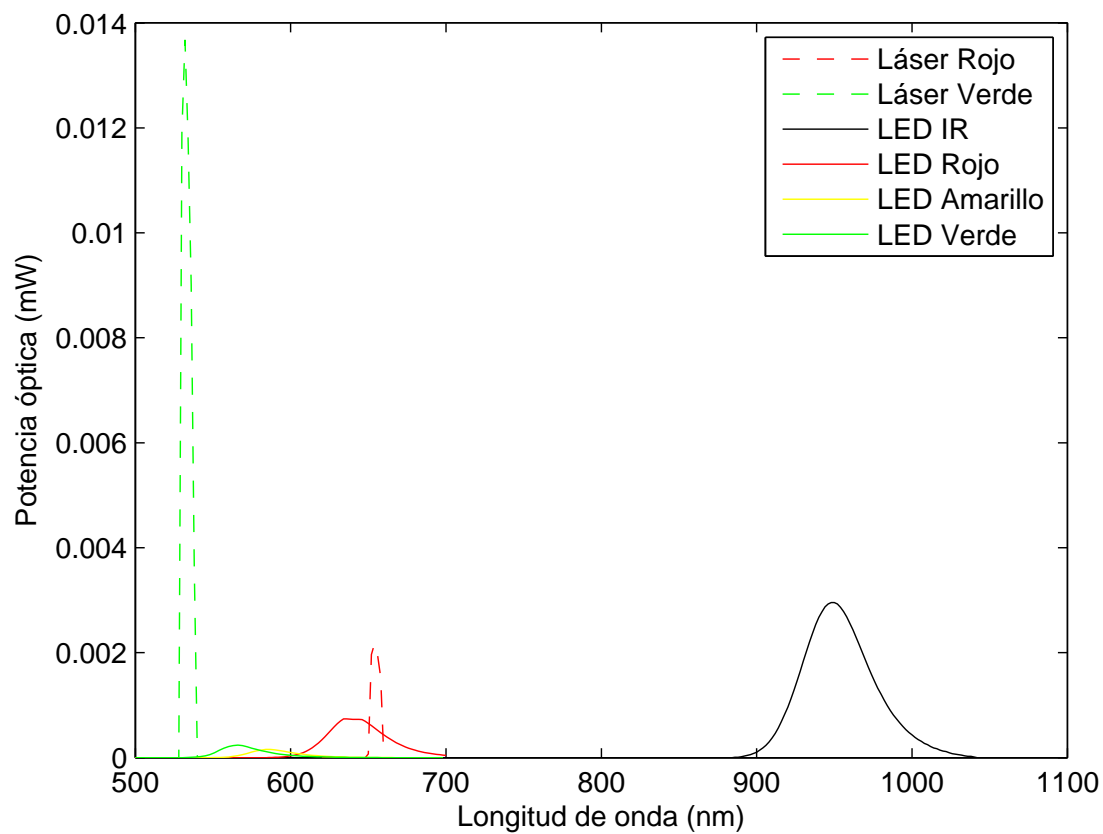


FIGURA 4.24: Análisis espectral del conjunto de dispositivos analizados

Capítulo 5

Presupuesto económico

El presupuesto en un proyecto de este tipo es un tema importante a tratar. Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, una de las razones importantes por las que se llega a la fabricación de un sistema propio de caracterización óptica, es el ahorro económico. Por esta razón, en lugar de comprar un sistema fabricado, se decide utilizar los elementos que ya se tienen y se trata de fabricar un equipo funcional. No obstante, siempre se hace necesaria la compra de nuevos materiales, así como en este caso la fabricación de la PCB.

5.1. Lista de materiales o BOM

La lista de materiales o **Bill Of Materials**, corresponde con el conjunto de los materiales necesarios para la realización del proyecto. Dichos materiales se muestran continuación:

Listado De Materiales Para Caracterización Óptica De Diodos Láser

Diseño : Caracterización óptica de diodos láser
Autor : Guillermo Caminero Fernández
Revisión : 4
Fecha de creación : lunes, 15 de febrero de 2016
Última modificación : domingo, 10 de julio de 2016
Número total de dispositivos : 105

26 Resistors

<u>Cantidad:</u>	<u>Referencia</u>	<u>Value</u>	<u>Precio €</u>	<u>Precio pesetas</u>	<u>Código Farnell</u>	<u>Package</u>
6	R1, R10, R11, R14, R16, R20	10k	0.0069€		2502786	0805
1	R2	1k	0.0069€		2502786	0805
1	R3	1M	0.0359€		2333577	0805
4	R4-R6, R19	270R	0.028€		2057730	0805
1	R7	1k8	0.0121€		2447595	0805
2	R8, R21	3k3	0.0093€		9234071	0805
1	R9	1k	0.0457€		1653281	0805
1	R12	33R	0.12€		2326834	0805
1	R13	12k	0.0371€		2333588	0805
3	R15, R18, R25	100R	0.0069€		2502784	0805
1	R17	6k8	0.0107€		9333479	0805
2	R22, R26	220R	0.0123€		9237402RL	0805
2	R23, R24	47R	0.0121€		2447666	0805

35 Capacitors

<u>Cantidad:</u>	<u>Referencia</u>	<u>Value</u>	<u>Precio €</u>	<u>Precio pesetas</u>	<u>Código Farnell</u>	<u>Package</u>
2	C1, C2	18pF	0.0291€		2497020	0805
23	C3, C5- C8, C10, C11, C13- C20, C22- C26, C30, C32, C34	100nF	0.0172€		2496944	0805
2	C4, C21	1uF	0.0392€		2496946	0805
1	C9	10nF	0.0244€		2496937	0805
7	C12, C27- C29, C31, C33, C35	22uF	0.369€		1457447	TC3528

13 Integrated Circuits

<u>Cantidad:</u>	<u>Referencia</u>	<u>Value</u>	<u>Precio €</u>	<u>Precio pesetas</u>	<u>Código Farnell</u>	<u>Package</u>
1	U1	LPC2103	5.57€		1294788	SQFP48-7X7
1	U2	FT232RL	3.86€		1146032	SSOP28
1	U3	TVS DIODE ARRAY	1.22€		1456415	SOT23-6
1	U4	MAX232	0.928€		2335536	SO16
1	U5	LDD100-1P		26100Ptas		LDD-100P
1	U6	HTC-1500		33840Ptas		2.54_PCB_SHOCKET
1	U7	MCP4922	2.68€		1332114	SO14
1	U8	TLV1117-18IDCY	0.459€		1755287	SOT223-4
1	U9	LD1117533R	0.55€		1202826	SOT223-4
1	U10	7805	0.34€		9666095	TO220
1	U11	7808	0.31€		1510257	TO220
1	U12	74HC4052	0.239€		1103171	SO16
1	U13	MCP6282	0.829€		1439459	SO8

10 Transistors

<u>Cantidad:</u>	<u>Referencia</u>	<u>Value</u>	<u>Precio €</u>	<u>Precio pesetas</u>	<u>Código Farnell</u>	<u>Package</u>
8	Q1-Q3, Q5, Q7- Q10	PMBT3904	0.12€		1081476	SOT23
1	Q4	IRLML2244TRPBF	0.343€		2468051	SOT23
1	Q6	2N7002	0.1343€		1859847	SOT23

7 Diodes

<u>Cantidad:</u>	<u>Referencia</u>	<u>Value</u>	<u>Precio €</u>	<u>Precio pesetas</u>	<u>Código Farnell</u>	<u>Package</u>
2	D1, D6	PMLL4448	0.099€		1097279	SOD80
1	D2	KA-3022SRC-4.5SF	0.49€		1142617	LEDKNIT_R
3	D3, D7, D8	KA-3022SGC-4.5SF	0.275€		1142615	LEDKNIT_G
1	D9	BAS40-04	0.14€		1797826	SOT23-D9

14 Miscellaneous

<u>Cantidad:</u>	<u>Referencia</u>	<u>Value</u>	<u>Precio €</u>	<u>Precio pesetas</u>	<u>Código Farnell</u>	<u>Package</u>
1	J1	MIN-USB-B5	0.763€		1125348	MINI_USB_B
2	J2, J5	CONN-D9M	1.79€		1084701	D-09-M-R
1	J3	CONN-D9F	1.79€		1084701	D-09-F-R
1	J4	LDM4407	573.97€			
1	J6	CONN-H2	0.0887€		1593458	CONN-SIL2
1	J7	POWER_CONN	0.185€		2493661+2493689	POWER_CONN
1	J8	SMA	3.85€		1019325	SMA_CON
1	J9	BNC	2.18€		1020954	BNC
1	RL1	RELE IM06GR	3€		1175070	RELE_TE_CONECTIVITY
1	RV1	BOURNS_200K	1.7€		1141414	BOURNS_TRIMMER
1	SW1	MC32872	0.326€		1712988	MC32872_LY
1	SW2	SW-SPDT	0.476€		1798776	CONN-SIL3
1	X1	14.7456MHz	0.587€		1842290	XTAL1200X480X320

domingo, 10 de julio de 2016 14:43:57

5.2. Fabricación de la placa de circuito impreso

Otra de las partes que componen el presupuesto total del proyecto es la fabricación de la placa de circuito impreso. Como se explica en el Capítulo B.11, el fabricante elegido es *Itead Studio* y la placa escogida es de 10 cm × 10 cm. El coste actual a día 15 de julio de 2016 es de 17.94€, coste al que hay que añadir los gastos de envío que ascienden a 9.26€.

En definitiva, el coste total de la placa de circuito impreso es de aproximadamente 27.2€.

5.3. Horas de trabajo

Como en todo proyecto, en el presupuesto no solo se incluyen los materiales, sino que también ha de incluirse del trabajo llevado a cabo por parte del ingeniero. Este trabajo también hay que costearlo y tenerlo en cuenta en el presupuesto final. Por consiguiente, en este apartado se hace una estimación de las horas invertidas en el trabajo. En la Tabla 5.1 se puede ver la estimación de horas.

Finalidad del tiempo empleado	Tiempo empleado
Prácticas de empresa curriculares: Estudio previo	150 h
Prácticas de empresa extracurriculares: Diseño y fabricación del sistema de caracterización	250 h
Desarrollo del software para el trabajo fin de grado	415 h
TOTAL	815 h

TABLA 5.1: Estimación de las horas de trabajo totales para la realización del proyecto

La estimación de horas en las que se ha realizado el proyecto, exceden en cierta medida, las definidas para la realización del mismo. Esto se debe a varios motivos como los siguientes:

- Problemas en la detección del carácter de fin de línea
- Problemas una vez fabricada la placa, por culpa de la señal del fotodiodo
- Dificultad a la hora de situar y rotar, muchos componentes y de gran tamaño en un espacio reducido de PCB
- Necesidad de aprender a trabajar con un entorno de programación nuevo como QT

5.4. Presupuesto final

Una vez analizadas las partes del presupuesto, se puede detallar el presupuesto final realizado en la tabla 5.2.

Descripción	Precio
Precio total de los materiales nuevos	42.2505€
Gastos de envío de los materiales	8€
Precio de materiales ya existentes	13656.19€
Precio de la placa de circuito impreso	17.94€
Gastos de envío de la placa de circuito impreso	9.26€
TOTAL	13733.6405€

TABLA 5.2: Presupuesto final para el proyecto

Hay que tener en cuenta que este presupuesto no se ajusta a la actualidad. El precio de los componentes que se compraron hace años ya no es el mismo. Por lo tanto, se detalla el precio actual de los siguientes componentes:

- HTC1500: Precio actual = 97\$ \approx 87.35€
- LDD200-1P¹: Precio actual = 95\$ \approx 85.55€

¹El LDD100-1P ya no se vende, por lo que se detalla el precio del LDD200-1P

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

A lo largo de la memoria del trabajo se ha explicado el funcionamiento del sistema de caracterización óptica. El trabajo tenía como objetivo la caracterización óptica de diodos, el cual ha cumplido satisfactoriamente con las expectativas ya que el dispositivo final ofrece unas características espectrales de gran sensibilidad.

Además de realizar el control del microcontrolador, el software de control del ordenador también pretende ofrecer un sistema GUI cuya interfaz sea sencilla e intuitiva para su cómoda utilización. Así mismo, ofrece un análisis simple por el que se obtienen parte de los análisis característicos.

No solo se ha llevado a cabo la realización del trabajo, sino que también es importante remarcar los conocimientos adquiridos a la hora de realizarlo. Para empezar, se ha adquirido experiencia de trabajo con entornos gráficos y con la programación de un lenguaje orientado a objetos, como es C++. Ambos objetivos no se han estudiado en los años de formación, pero ha sido un propósito personal llevarlos a cabo.

Otros aspectos como la fabricación de circuitos impresos (*PCB*), la programación de microcontroladores y el desarrollo de proyectos, resulta muy satisfactoria la formación adquirida en el grado de tecnologías de telecomunicaciones con especialidad en sistemas electrónicos. Dicha formación ha sido decisiva para la realización del trabajo ya que sin ella no hubiese sido posible su desarrollo.

Una vez terminado el TFG, se puede comprobar que se han cumplido también las competencias profesionales que se obtienen en este tipo de proyectos. Entre otras, me gustaría citar algunas de ellas.

ESPECÍFICAS:

SE1. *Capacidad para construir, explotar y gestionar sistemas de captación, transporte, representación, procesado, almacenamiento, gestión y presentación de información multimedia, desde el punto de vista de los sistemas electrónicos.*

El sistema descrito a lo largo del proyecto refleja la competencia citada

SE5. *Capacidad de diseñar circuitos de electrónica analógica y digital, de conversión analógico-digital y/o digital-analógica, de radiofrecuencia, de alimentación y conversión de energía eléctrica para aplicaciones de telecomunicaciones y computación.*

Esta competencia corresponde principalmente con el desarrollo del sistema eléctrico del Apéndice **B**

SE6. *Capacidad para comprender y utilizar la teoría de la realimentación y los sistemas electrónicos de control.*

El control de todo el sistema embebido se lleva a cabo mediante el microcontrolador *LPC2103*. Además, se ha tenido que estudiar a fondo el módulo de soporte de diodos láser *LDM4407*, que incluye un *PID*. Por lo tanto, se confirma el estudio sobre teoría de la realimentación

SE7. *Capacidad para diseñar dispositivos de interfaz, captura de datos y almacenamiento, y terminales para servicios y sistemas de telecomunicación.*

Se ha completado el diseño principal de la interfaz de comunicación entre el ordenador y el microcontrolador. Así mismo, la captura de datos del fotodiodo, el tratamiento y su almacenamiento

SE9. *Capacidad de analizar y solucionar los problemas de interferencias y compatibilidad electromagnética.*

Esta competencia destaca por su importancia. Tal como se comenta en el Capítulo de análisis 4.1, se ha tenido que superar este tipo de problemas, pese a la dificultad que éstos han presentado

GENERALES:

GE3. *Capacidad para desarrollar metodologías y destrezas de aprendizaje autónomo eficiente para la adaptación y actualización de nuevos conocimientos y avances científicos.*

Ya se ha comentado anteriormente los aspectos aprendidos de forma autónoma.

GE4. *Capacidad para redactar, desarrollar y firmar proyectos en el ámbito de la ingeniería de telecomunicación, que satisfagan las exigencias técnicas, estéticas y de seguridad, aplicando elementos básicos de gestión económica-financiera, de recursos humanos, organización y planificación de proyectos. Los proyectos tendrán por objeto, según la especialidad, la concepción, el desarrollo o la explotación de redes, servicios y aplicaciones de telecomunicación y electrónica.*

Como esta competencia indica, he aprendido a redactar y desarrollar proyectos técnicos del ámbito de la ingeniería de telecomunicación. Además, se ha intentado proveer de mecanismos de seguridad al proyecto como son: protección frente a descargas electrostáticas, compatibilidad electromagnética, diseño precavido para evitar que el usuario (inexperto) realice conexiones erróneas y evitar el destrozo del sistema. Por otro lado, se ha desarrollado el sistema teniendo en cuenta la gestión económica de los recursos.

6.2. Trabajo futuro

El sistema de caracterización de diodos láser no tiene por qué concluir en el presente proyecto, sino que puede resultar interesante tratar el tema para su posterior mejora. Los aspectos posibles para ampliar o mejorar del trabajo se dividen en los siguientes apartados.

6.2.1. Incorporación del LDD

El control del driver de diodos láser, es posiblemente uno de los principales avances que necesite el proyecto. La implementación de este integrado, habilita la alimentación

de los diodos láser. Dado que es el encargado de encender o apagar el láser, sin este integrado el HTC no tiene utilidad.

6.2.2. Incorporación del HTC

La integración en el sistema del controlador de temperaturas, es el segundo circuito integrado que podría ampliar el sistema de caracterización. Sin la implementación del controlador de diodos láser *LDD*, el *HTC* no tiene utilidad ya que no sirve de nada controlar la temperatura del encapsulado si no se puede alimentar el diodo láser.

6.2.3. Incorporación del LDM

El soporte para diodos láser complementa el control de temperatura del *HTC*. El *HTC* se encarga del control pero es el *LDM* el que calienta o enfría el diodo.

6.2.4. Incorporación del amplificador Lock-In LIA100

La incorporación de este último dispositivo, habilitaría el análisis de los diodos láser en comportamiento transitorio.

6.2.5. Mejora del Software

Se trata del punto más extenso de ampliación ya que engloba todas las actualizaciones del software, tanto del sistema embebido como del software encargado del control. A continuación se detallan los apartados correspondientes a este tipo de actualizaciones.

6.2.5.1. Programación del microcontrolador

Es necesario finalizar la programación referente al control de potencia y temperatura de los diodos láser. Ambos se controlan mediante una tensión (analógica) en una de las entradas del circuito correspondiente. Por este motivo, se ha dejado programado el periférico encargado de la comunicación *SPI*, ya que es el encargado de controlar el convertidor digital a analógico.

Una vez establecida la tensión en el pin correspondiente, se han dejado rutadas las líneas correspondientes a señales analógicas que precisan de su conversión a digital. Por este motivo, al *ADC* se le pasa como parámetro el canal que se desea convertir. Con estos datos se podrá extraer del sistema la tensión del diodo láser, corriente suministrada, potencia medida por el fotodiodo del encapsulado, etc.

Una vez realizado el procedimiento de control de diodos láser sobre el microcontrolador, éste ha de enviar todos los datos al ordenador, el cual, se encarga de realizar su procesamiento y posterior análisis.

6.2.5.2. Programación del software del ordenador

Este sub-apartado probablemente sea el punto más extenso, lo cual no significa que sea el más importante. Esto es así porque para poder obtener los datos es necesario implementar primero el control del microcontrolador. Una vez se haya programado el

microcontrolador con todas sus funcionalidades, y éste envíe los datos al ordenador, se llega a un punto en el que todas las posibles actualizaciones se desarrollarían sobre el ordenador.

Debido a limitado tiempo para la realización del proyecto no se han podido llevar a cabo las siguientes mejoras:

- Se propone una mejora en la detección del color utilizando las curvas RGB y un posterior procesado de mezcla de canales. Esto se debe a que el software actual, detecta el color por el máximo de emisión. El LED blanco, por ejemplo, es una composición de colores y cuando se ha intentado analizar, se ha comprobado como era de esperar que el resultado del análisis es insignificante.
- Se propone disponer de una fuente luminosa de potencia conocida, con el propósito de cuantificar las pérdidas que tienen lugar al atravesar el monocromador. Una vez cuantificadas las pérdidas, se puede calibrar el software para que compense el error
- En todo momento se puede mejorar el control de errores del software consiguiendo un software más robusto y probablemente más eficiente
- Se deben implementar métodos para el análisis numérico, en el caso de que se disponga de la información relativa a la temperatura y potencia de los diodos láser. Así como análisis eléctrico V_γ, r_s
- Con los datos obtenidos de los análisis se pueden ofrecer datos como la composición del semiconductor

6.2.6. Corrección hardware

Como intento de mejorar la entrada al sistema y conseguir así una eliminación del ruido captado por el cable, se hace necesario revisar la etapa de adquisición del sistema. Para ello, se han de tener en cuenta los aspectos tratados al principio del Capítulo 4, en el punto 4.1. En él, se describe el correcto posicionamiento del fotodiodo, así como la solución software llevada a cabo. No obstante, como también se comenta en el mismo capítulo, es interesante la idea de una solución hardware que elimine por completo los ruidos captados por el cable.

El primer aspecto que hay que tener en cuenta a la hora de realizar la modificación, es que el fotodiodo se encuentra en el sentido contrario al planteado. La Figura 4.1 muestra la conexión correcta del mismo.

El otro aspecto a tener en cuenta es que al invertir la señal, la salida del amplificador de corriente se invierte del mismo modo. En la situación anterior, del amplificador salían voltajes comprendidos entre 0 V y -10 V; sin embargo, con el nuevo diseño pasaría a dar de 0 V a 10 V.

Vistos estos aspectos, la solución planteada es la siguiente:

- Desoldar el conector BNC y soldarlo por debajo de la placa para que las entradas de señal inviertan su polaridad. Con esta solución, la entrada directa al amplificador de ganancia programable queda conectada de forma correcta

- Cortar todas las pistas del circuito impreso respectivas al amplificador operacional encargado de la amplificación inversa de la entrada del conector SMA. Gracias a esto, eliminamos la etapa inversora que convertía las entradas de 0 V y −10 V en 0 V y 3.3 V
- En vez de utilizar la etapa inversora, se diseña un divisor de tensión, de tal forma que adapte el rango de entrada desde los 10 V a los 3.3 V. Este divisor de tensión debe aprovechar las resistencias R20 y R21 del circuito, de forma que el divisor de tensión se corresponda con el representado en la Figura 6.1. Para la elección de las resistencias R20 y R21, se ha de cumplir la Ecuación 6.1

$$\frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{3,3}{10} \Rightarrow R_{21} = \frac{1}{2} \times R_{20} \quad (6.1)$$

- Como se han cortado las pistas correspondientes al amplificador operacional, se hace necesario unir la salida del divisor (V_{adc} de la Figura 6.1) con la conexión correspondiente al (switch) jumper encargado de la selección de ganancia interna o externa. Este jumper conecta directamente con la entrada del convertidor analógico a digital del microcontrolador
- Incluyendo a la conexión anterior, se necesita la conexión a tierra de la resistencia R21 como se puede ver en la Figura 6.1

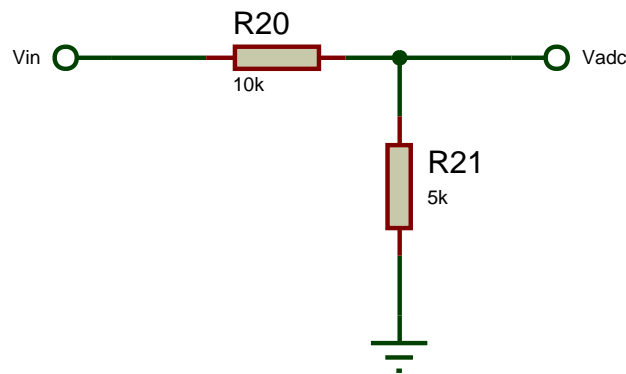


FIGURA 6.1: Divisor de tensión planteado como solución

Una vez modificados los puntos mencionados, el diseño para la entrada directa al amplificador de ganancia programable queda igual (solo se cambia el conector BNC). Sin embargo la entrada desde el amplificador de corriente *HMS* sufre las modificaciones que se aprecian en la Figura 6.2.

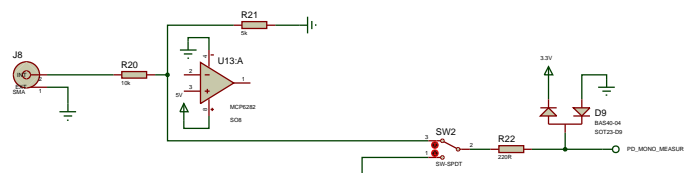


FIGURA 6.2: Entrada corregida desde el amplificador externo

En la Figura 6.3 se pueden ver la modificaciones necesarias sobre el layout eléctrico. En esta figura se denotan los colores, de forma que el verde representa las conexiones que faltan por realizar (cables verdes a soldar), y las pistas de color morado corresponden con las que hay que cortar. En los puntos citados con anterioridad, se ha explicado las razones por las cuales se necesitan estas nuevas pistas o se necesita cortar ciertas pistas ya existentes.

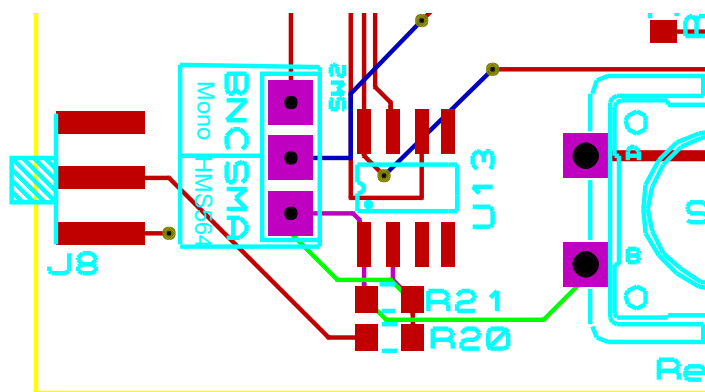


FIGURA 6.3: Parte del layout que corrige el error en la entrada de datos

Apéndice A

Estudio de los componentes disponibles

A.1. Objetivos, breve descripción

La finalidad de la práctica en empresa es analizar las características y el modo de operación de diferentes componentes disponibles. El objetivo es utilizarlos posteriormente en el diseño y fabricación de un equipo de caracterización de fuentes emisoras de luz, en general; y en particular, de diodos láser de baja potencia ($<10\text{ mW}$).

El objetivo fundamental engloba varios puntos, los cuales se irán desarrollando a lo largo de la práctica. Éstos son:

- Estudio previo de los elementos disponibles en el laboratorio para su posible introducción o re-utilización posterior en el diseño Hardware.
- Selección de los elementos necesarios para la caracterización óptica completa de los diodos.
- Revisión de proyectos fin de carrera.

A.2. Monocromador

A.2.1. Introducción

Un monocromador es un dispositivo óptico que permite seleccionar y transmitir una estrecha banda de longitudes de onda, ya sean electromagnéticas o no, a partir de una fuente emisora que produzca una amplia gama de longitudes de onda.

Se compone, en general, de:

- Una ranura o rendija de entrada que proporciona una imagen estrecha y casi coherente de la fuente de radiación.
- Un colimador que hace paralela la radiación procedente de la rendija de entrada.
- Una red o prisma para dispersar la radiación incidente.
- Otro colimador para formar la imagen de la rendija de entrada sobre la rendija de salida.

- Una ranura de salida para aislar la banda espectral deseada.

En el caso del sistema de caracterización óptica de este trabajo, se dispone del monocromador *SpectraPro-300i* de la empresa *Acton Research Corporation*. Como se puede ver en la figura A.1, el monocromador está compuesto por los puntos anteriormente mencionados, ya que son los elementos básicos.

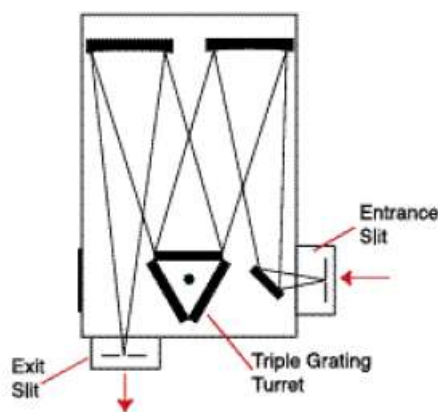


FIGURA A.1: Estructura interna del monocromador

A.2.2. Componentes del monocromador

Dependiendo de la configuración empleada para conseguir el efecto de un monocromador, constará de unos componentes u otros. En el caso del monocromador *SpectraPro-300i* corresponde a una configuración de *Czerny-Turner*. [9]
Un monocromador basado en *Czerny-Turner* consiste en dos espejos cóncavos y una red de difracción, cuya estructura interna será similar a la de la figura A.2.

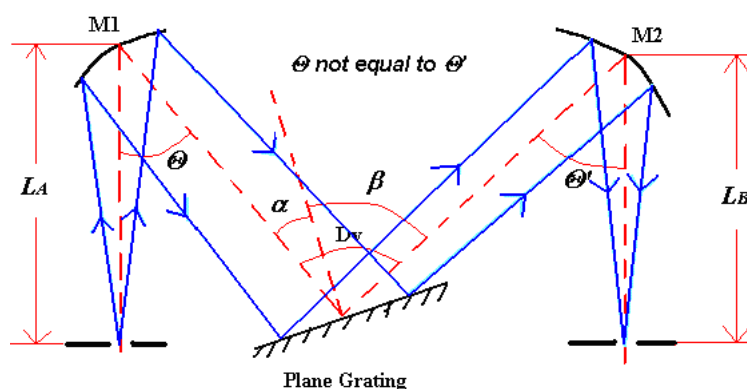


FIGURA A.2: Componentes del monocromador
[19]

LA - Distancia al colimador de entrada
LB - Distancia desde el colimador de salida

h - Altura de rendija de entrada

h' - Altura de la imagen en la rendija de entrada

α - Ángulo de incidencia

β - Ángulo de difracción

w - Anchura de la rendija de entrada

w' - Anchura de la imagen en la rendija de entrada

Wg - Ancho de una red/grating rectangular

Hg - Alto de una red/grating rectangular

A.2.2.1. Rendijas

El monocromador *SP-300i* dispone de dos rendijas o *Slits*, una de entrada y otra de salida; ambas con un ajuste de $10\ \mu\text{m}$ a $3\ \mu\text{m}$ de ancho y alturas de $4\ \text{mm}$ a $14\ \text{mm}$.^[1]

La cantidad de luz en el sistema corresponderá directamente con la relación ancho por alto de la rendija y del ángulo de incidencia.

A.2.2.2. Colimador

La dispersión o difracción sólo es controlable si la luz es colimada, es decir, si todos los rayos de luz son paralelos o casi paralelos.

La luz de entrada resulta colimada tras el primer espejo *M1*, como se puede apreciar en la Figura A.2, y dicha luz de entrada se refleja hacia la rejilla de difracción.

A.2.2.3. Red de difracción o grating

En óptica, una red de difracción es una superficie reflexiva con patrón regular que sigue una serie de líneas paralelas, las cuales dividen (difractan) la luz en varios haces de luz que viajan en diferentes direcciones. Las direcciones de esos haces de luz dependen del espaciado de la red y de la longitud de onda de la luz incidente, de modo que la red actúa como un elemento dispersivo.

La condición de máxima intensidad es la misma que en el experimento de la doble rendija, pero con un gran número de rendijas. El máximo de intensidad está muy marcado y estrecho, proporcionando una alta resolución para las aplicaciones espectroscópicas. Así mismo, la separación angular del máximo, generalmente es mucho mayor debido a la pequeña separación de las rendijas en la red de difracción; por lo que es una herramienta muy útil para la separación de las líneas espectrales asociadas con las transiciones atómicas.

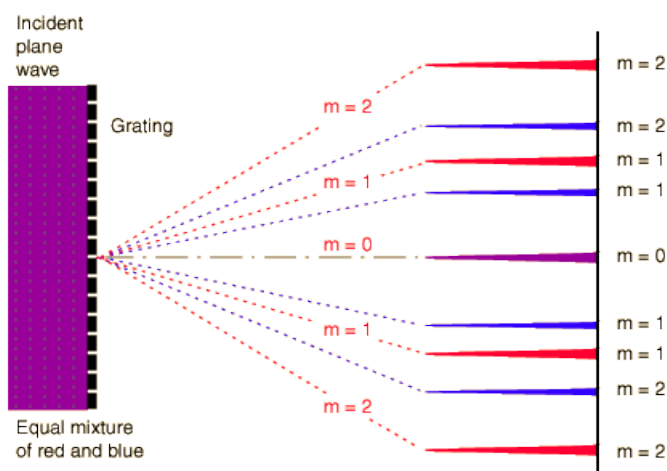


FIGURA A.3: Difracción de un grating

Este efecto se observa, por ejemplo, cuando reflejamos la luz con un CD. La separación nominal de las pistas en un CD es de $1.6 \mu\text{m}$, correspondiente a unas 625 pistas por milímetro.

El monocromador disponible en el laboratorio, *SP300i*, consta de una red grating de 1200 g mm^{-1} , capaz de ofrecer una resolución espectral de $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm @ } 435.8 \text{ nm}$.

Esta red grating se encuentra instalada en una *triple torre* con capacidad, como su propio nombre indica, de soportar tres gratings distintas. En el laboratorio solo están instaladas la torre por defecto y la grating por defecto de 1200 g mm^{-1} . Con el movimiento de dicha torre, se puede barrer el rango de longitudes de onda desde $\lambda = 0 \text{ nm}$ a 1400 nm . Sin embargo, este rango no es útil ya que el sensor encargado de la lectura no es capaz de barrer ese rango. El rango óptico completo que se puede barrer de forma útil con este instrumento está comprendido entre $\lambda = 185 \text{ nm}$ al infrarrojo lejano. Sin embargo, el rango se limitará al rango del sensor óptico *SI-440*, disponible en el laboratorio. Por lo tanto, será necesario trabajar en un rango aproximado de $\lambda = 400 \text{ nm}$ a un máximo teórico de 1100 nm . Este rango se puede ver gráficamente en la figura A.15. A continuación se enumeran otros parámetros relativos al grating:

- Dispersión: 2.7 nm/mm
- Exactitud: $\pm 0.2 \text{ nm}$
- Repetibilidad de las medidas: $\pm 0.05 \text{ nm}$
- Paso del motor: 0.0025 nm (nominales)

A.2.3. Ingeniería inversa realizada

Para poder realizar el diseño de un sistema completo de caracterización óptica, primero se hace necesario conocer el funcionamiento del monocromador, ya que necesitamos ser capaces de separar pequeñas longitudes de onda. Por este motivo se realiza previamente un estudio de ingeniería inversa sobre este monocromador. Para ello, se instala el software original en una máquina virtual (ya que no se dispone de ningún Windows95). Por motivos de compatibilidad con los puertos USB, la instalación se

realiza finalmente sobre una maquina virtual con sistema operativo Windows XP. Este sistema operativo guarda multitud de compatibilidades con Windows 95, por lo que el software funciona correctamente.

El monocromador *SP-300i* dispone de un microcontrolador interno, por lo que su control se realiza mediante una comunicación directa con él.

A.2.3.1. Comunicación con el SP-300i

La comunicación con el monocromador se puede realizar de dos formas: con un PC o utilizando el controlador de escaneo remoto 300-749. Para este informe el control se realizará utilizando un PC.

Partiendo de esta premisa, la comunicación se podrá realizar por un puerto *GPIO* o mediante el puerto serie del ordenador COM1 o COM2 (*RS232*). Éste último es de gran interés por su facilidad para conectarlo con el microcontrolador deseado, gracias a sus UART correspondientes. Las conexiones se pueden ver en las figuras A.5 y A.4.

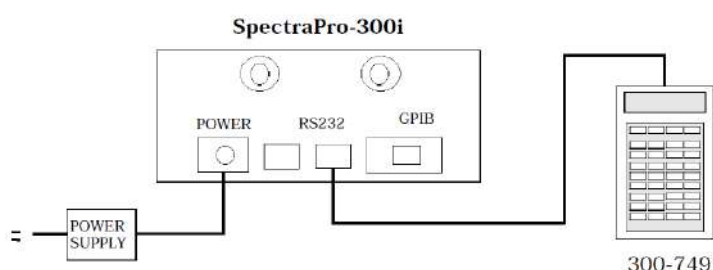


FIGURA A.4: Conexión con el controlador de escaneo

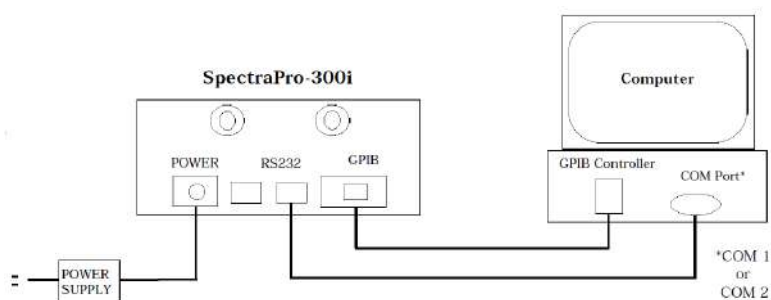


FIGURA A.5: Conexión con el ordenador

RS232 Para la conexión *RS232* tenemos que las conexiones se realizarán de la siguiente manera:

pin #	description
1	open
2	RD data from SP-300i to computer
3	TD data from computer to SP-300i
4	open
5	ground
6	open
7	RTS connect these two pins together
8	CTS
9	open

Alimentación Para alimentar el monocromador se utiliza el mecanismo proporcionado por el fabricante cuyos pines de conexión son los que se ven en la Figura A.6.

PIN#	DESCRIPTION
1	+5V
2	GND
3	GND
4	+24V

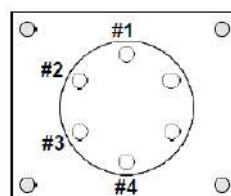


FIGURA A.6: Esquema de conexión de alimentación

A.2.3.2. Cable Prolific

Puesto que los ordenadores actuales no disponen de puertos RS232, se hace necesario utilizar un cable encargado de convertir el protocolo serie USB en RS232. El cable proporcionado por el departamento de electrónica es, concretamente, de la marca *Prolific Technology Inc.* Gracias a este cable podremos establecer de manera directa la comunicación con el monocromador.

Para el correcto funcionamiento del cable se hace necesaria la instalación de los drivers en (*Windows10*). Teniendo en cuenta los problemas que han surgido en el laboratorio, no es conveniente utilizar el último driver proporcionado por el fabricante. Si se instala la última versión, cuando intentemos utilizarlo, nos dará el siguiente error: "This Device cannot start (Code 10)". Este error es debido a que *Prolific* ha dejado de dar soporte (EOL) a los chips de los modelos: *PL2303HX(Rev A)* y *PL2303X (Rev A)*. Por éste motivo, el propio fabricante advierte de los problemas que tendrán dichos chips en las versiones de Windows 8 y 10. Se propone, como solución, cambiar a la última versión del chip *PL2303TA*.

En la práctica, al introducir el cable en el puerto USB, el ordenador instaló automáticamente la última versión del driver por lo se produjo el error mencionado anteriormente. Como solución, se llegó a la conclusión de utilizar un driver para versiones anteriores de Windows, en concreto la versión de Windows Vista.

Para más información sobre cómo instalar los drivers para la utilización del cable, se

puede visitar la URL http://www.miklor.com/COM/UV_Drivers.php [12].

Dichos drivers se pueden descargar tanto en la URL anterior, como en las siguientes direcciones:

https://www.pyramidthimesystems.com/Customer-Content/WWW/Technical_Downloads/Win_Driver_Prolific_3_2_0_0.exe
<http://www.w9lrt.com/default/assets/File/baofengprolificvista.zip>

Una vez instalados los drivers, se puede comprobar que el modelo del chip es el *PL-2303 XA / HXA chip*, gracias al programa de chequeo del propio fabricante. Por razones comentadas anteriormente, este modelo no funcionaba correctamente en el ordenador por motivos de compatibilidad con las nuevas versiones de los drivers. Para obtener el funcionamiento que se espera, es necesario el driver de Windows Vista.

A.2.3.3. Software original

En primer lugar, se instala el software de control del monocromador. Una vez instalado, el objetivo es conocer cómo se establece la comunicación del ordenador con el microcontrolador del monocromador. Ésto se realiza escuchando el puerto serie por el que se comunica nuestro ordenador.

Para realizar la escucha, se puede utilizar cualquier programa de monitoreo o sniffer del puerto serie. En este caso, el programa elegido es el *Serial Port Monitor* de Elitima Software [16]. Con este software se puede analizar la actividad del puerto serie COM del sistema¹. Su interfaz es amigable y ofrece una versión de prueba el suficiente tiempo, como para analizar todos los comandos enviados por el monocromador.

En segundo lugar se instala el sniffer del puerto serie. Después se configura dicho software con el puerto correcto. Posteriormente, se inicia el programa del monocromador, por lo que empiezan las comunicaciones correspondientes entre el microcontrolador del monocromador y el programa de control.

Si todo funciona de forma correcta y el monocromador responde al puerto, obtendremos por pantalla una ventana como la que se muestra en la Figura A.7. Esta ventana simplemente indica la versión de software y el dispositivo para el cual funciona. Cuando se presiona el botón “OK”, en segundo plano el software se encarga de “preguntar” al monocromador sus características iniciales.



FIGURA A.7: About SpectraPro

¹Hay que asegurarse de que este puerto COM sea el 1 o el 2, ya que el monocromador espera uno de éstos. En el caso de que el puerto sea otro, haría caso omiso a cualquier comando.

La sucesión de comandos que se envían, se puede apreciar en el listado A.1. Teniendo en cuenta que la comunicación es bidireccional, los comandos enviados por el software del PC son los que están precedidos de (->) y los comandos que se reciben del monocromador están precedidos de (<-).

```

1 ( -> ) .2 .
2 ( <- ) .2 . 2 ok
3 ( -> ) ..s
4 ( <- ) ..S <-Top ok
5 ( -> ) MODEL
6 ( <- ) MODEL SP-305 ok
7 ( -> ) .s
8 ( <- ) .s <-Top ok
9 ( -> ) ?EEOPTIONS
10 ( <- ) ?EEOPTIONS options 010100 ok
11 ( -> ) ?EEOPTIONS
12 ( <- ) ?EEOPTIONS options 010100 ok
13 ( -> ) mono-eestatus
14 ( <- ) mono-eestatus
15 ( <- ) .serial number 3050242
16 ( <- ) .turret 1
17 ( <- ) .grating 1
18 ( <- ) . 0 1 2 3 4 5 6
19 ( <- ) .offset 0 1536000 3072000 0 1536000 3072000 0
20 ( <- ) .adjust 980000 980000 980000 980000 980000 980000 980000
21 ( <- ) .delay 0
22 ( <- ) .wavelength 0
23 ( <- ) .rate 100000
24 ( <- ) .options 010100
25 ( <- ) ok
26 ( -> ) ?gratings
27 ( <- ) ?gratings
28 ( <- ) .Å-1 1200 g/mm BLZ= 750 n
29 ( <- ) . 2 Not Installed
30 ( <- ) . 3 Not Installed
31 ( <- ) . 4 Not Installed
32 ( <- ) . 5 Not Installed
33 ( <- ) . 6 Not Installed
34 ( <- ) . 7 Not Installed
35 ( <- ) . 8 Not Installed
36 ( <- ) . 9 Not Installed
37 ( <- ) . ok

```

CÓDIGO A.1: Comandos de inicio

Tras pulsar el botón “OK”, el software nos ofrece las siguientes posibilidades:

- Realizar una operación con el monocromador *Operation*
- Instalar un nuevo grating *Install Grating*
- Utilizar el software en modo terminal, permitiendo la introducción manual de comandos *Terminal Mode*
- Configurar valores de reset por defecto *Start-Up Defaults*

- Ajustar el offset para una longitud de onda *Adjust Wavelength Offset*
- Ajustar el grating para una longitud de onda *Adjust Wavelength Gadjust*
- Valores de Calibración *Calibration Values*
- Salir del programa *EXIT Program*

Estas posibilidades se pueden ver en la Figura A.8.

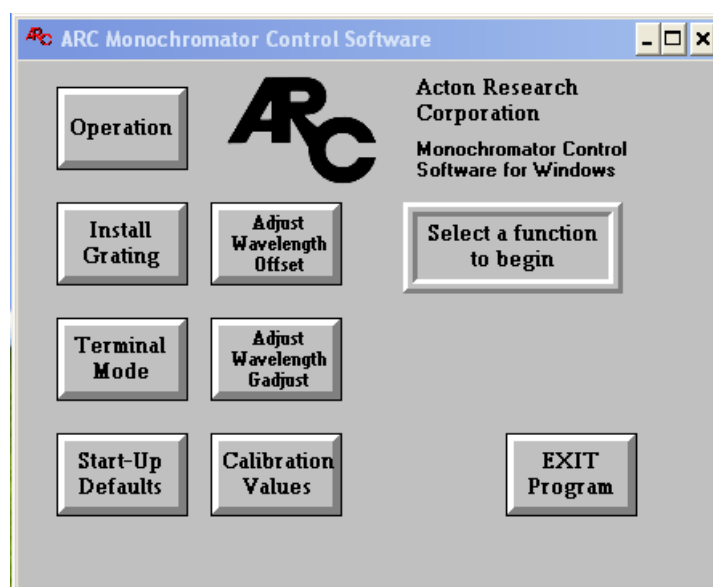


FIGURA A.8: ARC Monochromator Control Software

Menú Operation: Dentro del menú operación encontramos las posibilidades más interesantes para nuestro proyecto, ya que este menú nos permite ir a una longitud de onda, hacer barridos, e incluso, la posibilidad de seleccionar la velocidad de barrido. Como se aprecia en la Figura A.9, se ofrece la posibilidad de modificar otros parámetros como: selección del grating con el que se realizará la operación, la selección de la torre y el tamaño del paso *Jog*. Sin embargo, éstos últimos no serán tan interesantes ya que solo se dispone de una torre y un grating.

Comando	Respuesta	Periodo
?IM	ok	1 s
?IW	ok	1 s

TABLA A.1: Test de presencia del monocromador

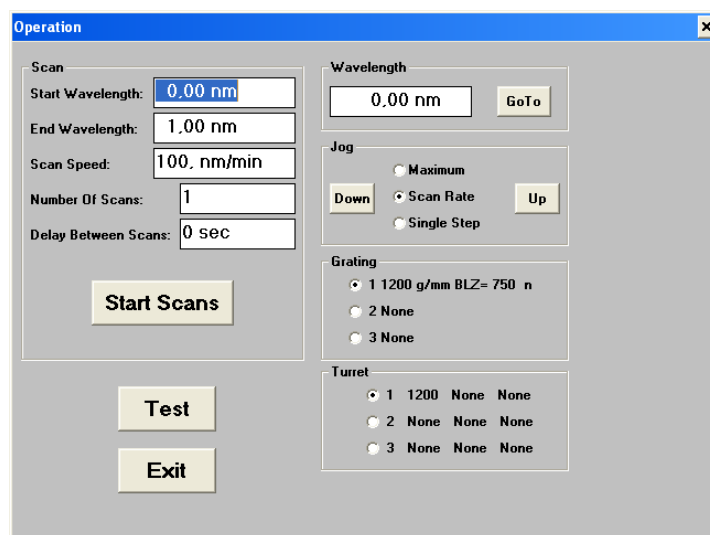


FIGURA A.9: Menú operación software SpectraPro

Además el software de control realiza una comprobación permanente con periodo 1 s para asegurarse de que la conexión permanece establecida. Es por esto que se necesita enviar una serie de comandos por el puerto serie, que se pueden apreciar en la Tabla A.1.

Menú Install Grating: Este menú nos permite instalar y calibrar de una nueva rejilla de difracción, así como la desinstalar una ya existente. Como se puede apreciar en la Figura A.10, antes de instalar o desinstalar, hay que seleccionar la rejilla a la que nos estaremos haciendo referencia. Para la instalación tendremos que aportar, también, la información respectiva: *Grooves* y *Blaze*.

A pesar de estas posibilidades, no se instalará ninguna otra rejilla. Pese a todo, la opción estará disponible y bajo contraseña para que solo se pueda modificar con autorización.

Cuando se instala una nueva rejilla, normalmente es necesario que se calibre el monocromador para la nueva posición de la misma. Existen dos valores en la memoria no volátil del monocromador que afectan a esta calibración. Éstos son: el “Offset” y “Gadjust”, los cuales se pueden modificar accediendo a los menús correspondientes de ajuste².

²NOTA: Se debe ajustar el Offset primero.

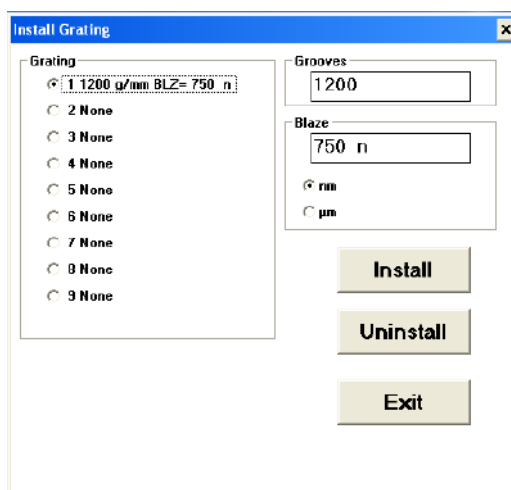


FIGURA A.10: Menú de instalación de rejillas

Menú Adjust Offset: El menú de ajuste de offset (Figura A.11) permite la selección de un offset individualizado para cada grating instalado. Este ajuste se hace típicamente buscando la longitud de onda de máxima intensidad, próxima a la longitud de onda cero, utilizando una fuente de calibración y un sistema de lectura como por ejemplo el *Actor NCL con el software de SpectraSense*. Si no se dispone de estos elementos, se puede calibrar con cualquier otro sistema de medida utilizando las operaciones de escaneo o avance. Una vez se tiene la intensidad máxima próxima a cero, se devuelve el valor para el offset.

El cálculo del offset por medio del botón **Calculate New Offset** no implica el cambio del offset para el grating seleccionado. Para ello hay que pulsar el botón de **Save New Offset**, y éste se almacenará en la memoria no volátil del SP-300i.

Aunque sea recomendable el ajuste del offset a cero, se puede ajustar a condición del usuario.³

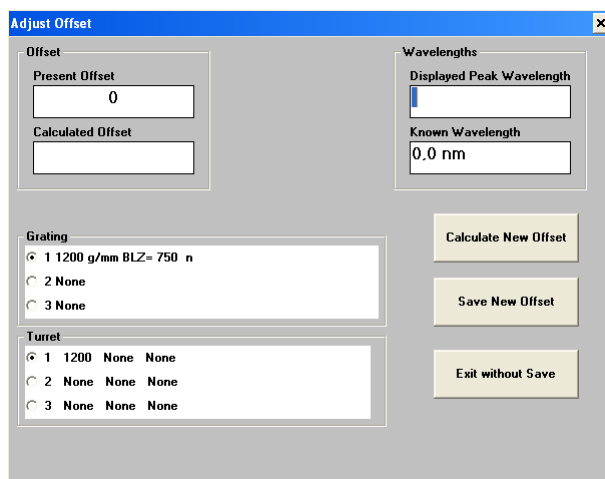


FIGURA A.11: Menú de calibración del offset

³La mejor opción es utilizar una longitud de onda baja para el ajuste del offset y una longitud de onda alta para el ajuste del Gadjust.

Menú Adjust Gadjust: Cuando se presiona este botón aparece una ventana similar a la del ajuste del offset como se puede ver en la Figura A.12. Las operaciones de este menú también son similares a las del ajuste del offset.

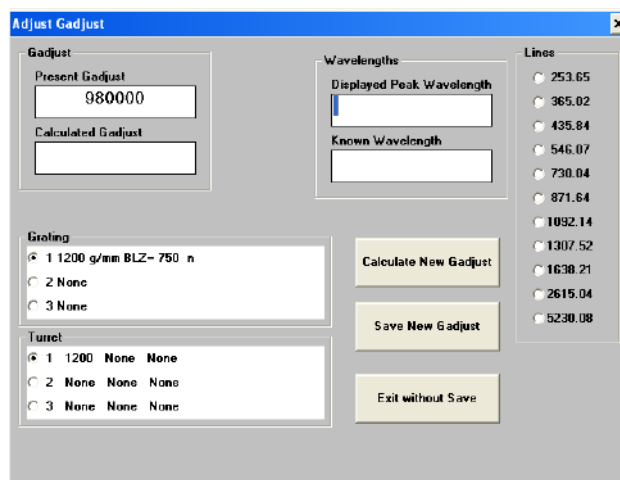


FIGURA A.12: Menú de calibración del Gadjust

Menú Start-UP defaults: Este menú permite la configuración de los valores por defecto utilizados en la inicialización del monocromador. Los valores inicializados de fábrica son:

- Longitud de onda: 0.00 nm
- Grating: 1
- Velocidad de barrido: 100.0 nm min⁻¹

Pulsando el botón **Save New Values** se pueden modificar dichos valores de la memoria no volátil del monocromador. Para salir sin guardar los cambios pulsar el botón **Exit Without Save**.

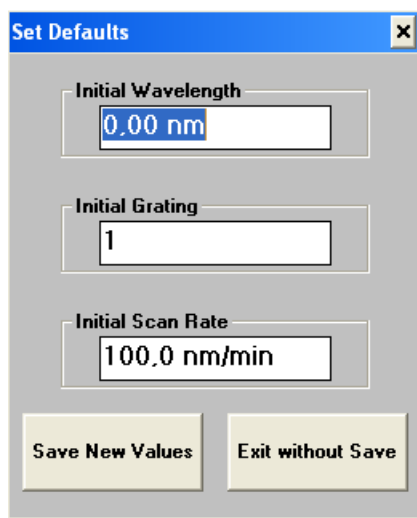


FIGURA A.13: Menú de configuración de valores iniciales

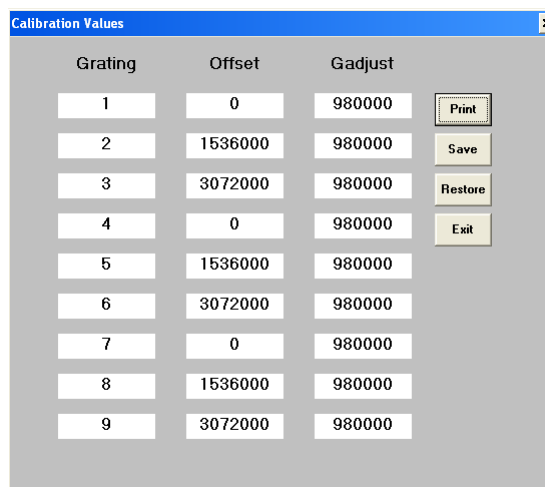
Calibration Values: Dentro de esta selección, el programa hace una comprobación de los parámetros de calibración almacenados en la memoria no volátil del monocromador. Una vez se tienen los parámetros, el programa los vuelca en formato tabla como se puede ver en la Figura A.14. Entre estos parámetros se encuentran los valores de calibración para cada rejilla del monocromador⁴.

Hay dos valores de calibración para cada posición de rejilla:

- El valor de offset: corresponde con la posición de longitud de onda cero, en pasos del motor desde el punto de inicialización, para la rejilla especificada del monocromador.
- El valor Gadjust: factor que se utiliza para hacer ajustes finos a las longitudes de onda más altas para cada rejilla.

Para las rejillas que no se han instalado se mostrarán los valores por defecto de estos parámetros.

Además, este sub-menú permite la realización de funciones como: imprimir los valores utilizando el botón **Print** o exportar los mismos con el botón **Save**. Así mismo, podemos restablecer los valores predeterminados para todas las rejillas utilizando el botón **Restore**.



Grating	Offset	Gadjust
1	0	980000
2	1536000	980000
3	3072000	980000
4	0	980000
5	1536000	980000
6	3072000	980000
7	0	980000
8	1536000	980000
9	3072000	980000

Buttons: Print, Save, Restore, Exit

FIGURA A.14: Menú de comprobación de los valores de calibración

Terminal Mode: Es la última opción del menú principal. La función del modo terminal permite un control directo del monocromador, utilizando los comandos descritos más adelante en el punto A.2.4 de este capítulo.

Un aspecto a tener en cuenta es que en modo terminal, los comandos no se envían hasta que se presiona la tecla de "Enter" ↵, y solo se dan por aceptados cuando se recibe el ok por parte del monocromador.

⁴La tabla solo muestra los parámetros, no indica que se puedan modificar.

A.2.4. Comandos del monocromador

Para la correcta utilización del monocromador, se necesita saber cuáles son los comandos intercambiados entre el microprocesador de éste y el software del PC.

Para ello, se utiliza el programa “*Serial Port Monitor*”[16] para monitorizar el puerto serie del PC. Una vez instalado este software, se procede a realizar todas las operaciones disponibles en el software original del monocromador.

Muchos de los comandos que se pueden enviar, están proporcionados en las especificaciones del monocromador en el documento oficial del mismo[1]. Sin embargo, como no está completo, a continuación se detallará cada comando. También se detallarán los comandos que no se encuentran en el documento del monocromador.

En la Tabla A.2 se puede ver la subsección de comandos encargados del movimiento del monocromador para dar lugar a las diferentes longitudes de onda. Estos comandos permiten la modificación de la longitud de onda actual, así como la comprobación de la misma.

En la Tabla A.3 se encuentran los comandos del monocromador encargadas de la modificación de cualquier parámetro respectivo a las rejillas o gratings. Con éstos, podemos realizar ordenes de instalación, comprobación y ajustes de cada rejilla.

En la Tabla A.4 se encuentran los comandos encargados de la calibración de las rejillas, así como los comandos respectivos a la información del producto, como por ejemplo, el modelo y el serial.

GOTO	Ordena al monocromador ir a la longitud de onda de destino a la velocidad máxima del motor. Acepta la longitud de onda de destino en nm como un número de coma flotante, con hasta 3 dígitos después del punto decimal o una longitud de onda entera sin decimales.
<GOTO>	Igual que GOTO por compatibilidad con software de versiones anteriores.
NM	Ordena ir a una longitud de onda de destino a una velocidad constante en nm/min especificada por la última orden. Acepta la longitud de onda en nm destino como un número de coma flotante con hasta 3 dígitos después del punto decimal o número entero sin decimales.
<NM>	Igual que NM por compatibilidad con software de versiones anteriores
>NM	Similar a NM, excepto que en este caso se devuelve el control al usuario inmediatamente en lugar de esperar a que se alcance la longitud de onda indicada en la orden. Puede ser utilizado con ?NM o MONO-?DONE. Este comando se debe terminar con MONO-STOP. NOTA: Utilizar el comando NM cuando no se requiera la comunicación con el monocromador durante la exploración.
?NM	Devuelve la longitud de onda actual del monocromador con una resolución de 0.01 nm. A parte de la longitud de onda envía en modo texto las unidades "nm". POR EJEMPLO: ?NM devuelve 300.00 nm
MONO-?DONE	Se utiliza junto con el comando >NM para determinar si monocromador ha llegado al destino. Devuelve 0 si el movimiento no se ha completado, 1 si el movimiento se ha completado.
MONO-STOP	Detiene el movimiento de la longitud de onda del monocromador después del uso del comando >NM.
?NM/MIN	Devuelve la actual velocidad de barrido en nm / min a una resolución de 0.01 nm/min con unidades nm/min adjuntas. POR EJEMPLO: ?NM / MIN 100.00 nm / min
NM/MIN	Fija la velocidad de barrido

TABLA A.2: Comandos de movimiento de la longitud de onda

GRATING	Coloca la rejilla especificada a la longitud de onda en la que se encuentra la grating actual. Se permiten hasta nueve rejillas en tres torretas. NOTA IMPORTANTE: Este comando supone que se ha especificado la torreta correcta mediante el comando turret.
?GRATING	Devuelve el número de grating actualmente utilizada (1 - 9).
?GRATINGS	Devuelve la lista de gratings instaladas con la posición groove density blaze. La grating actual se especifica con una flecha.
TURRET	Especifica la torreta actualmente instalada o la torreta que se instalará. POR EJEMPLO: Si se va a instalar la segunda torreta, es necesario enviar el comando 2 TURRET para asegurar el uso de los parámetros correctos.
?TURRET	Devuelve la torreta instalada correctamente numerada de 1 - 3.
INSTALL	Instala nuevos parámetros de rejilla en la memoria no volátil del monocromador SpectraPro. POR EJEMPLO: 1-120-500 5 INSTALL coloca una grating blazed de 1.200 g/mm a 500nm en la posición de la rejilla en la torreta #.
SELECT-GRATING	Especifica el número de rejilla que se instalará (1 - 9).
G/MM	Especifica la densidad de la ranura de rejilla que será instalada en g/mm. POR EJEMPLO: 1200 g/mm
BLAZE	Especifica la longitud de onda del blaze y las unidades de la rejilla que se instalarán con 7 caracteres a elección del usuario. A diferencia de otros comandos, este comando se emite antes de los parámetros. Una vez emitido el comando, el SP-300i responde con "_____". A continuación, se introducen siete caracteres (éstos pueden ser números, letras, espacios o caracteres especiales).
UNINSTALL	Se utiliza para eliminar una rejilla y sus parámetros de la memoria no volátil del SP-300i.

TABLA A.3: Comandos de control de grating

INIT-OFFSET	<p>Establece el valor del offset de la rejilla designada.</p> <p>Los valores por defecto son: 0 para las rejillas 1, 4 y 7; 1536000 para rejillas 2, 5 y 8; y 3072000 para las rejillas de 3, 6 y 9.</p> <p>Las limitaciones a los ajustes son +/- 2500 para una rejilla de 1200 g/mm.</p> <p>Esto corresponde a un error de más de +/- 5 nm para una rejilla de 1200 g/mm.</p> <p>Los límites se ajustan por densidad de surcos de rejilla.</p> <p>POR EJEMPLO: el error para una rejilla de 600 g/mm es de +/- 5000.</p> <p>El designador de la densidad de rejilla que utiliza este comando es grating# - 1.</p> <p>POR EJEMPLO: 3072056. 8 INIT-OFFSET para el ajuste de compensación de la rejilla #9 - 3ª rejilla en la torreta #3.</p> <p>NOTA: Este comando requiere un punto decimal después del valor de desplazamiento.</p>
INIT-SP300-OFFSET	<p>Igual que INIT-OFFSET, excepto que no se usa punto decimal después del valor de desplazamiento.</p> <p>POR EJEMPLO: 3072056 8 INIT-SP300-OFFSET</p>
INIT-GADJUST	<p>Fija el valor de ajuste de rejilla para la rejilla designada.</p> <p>Los valores por defecto son 10000 para todas las rejillas.</p> <p>Los límites en el parámetro de este comando son +/- 1000 para todas las rejillas.</p> <p>El designador de rejilla se utiliza con el comando grating# - 1.</p> <p>POR EJEMPLO: 9993 1 INIT-GADJUST para establecer el GADJUST en la segunda rejilla de la torreta #1.</p> <p>NOTA: Este comando es para mantener la compatibilidad con las aplicaciones anteriores SpectraPro.</p> <p>Para las aplicaciones nuevas, utilice el comando INIT-SP300-GADJUST.</p>
INIT-SP300-GADJUST	<p>Igual que INIT-GADJUST. POR EJEMPLO: 999322 4 INIT-SP300-GADJUST para establecer GADJUST en la segunda rejilla de la torreta #2.</p>
MONO-EESTATUS	<p>Devuelve la configuración y los parámetros de calibración de rejilla para todas las rejillas.</p>
RESTORE-FACTORY-SETTINGS	<p>Retorna todos los parámetros al estado de fábrica, incluyendo también los de calibración del grating</p> <p>NOTA: Este comando sobrescribirá cualquier parámetro de calibración establecido por el usuario.</p>
MONO-RESET	<p>Inicializa el monocromador SpectraPro. Es necesario utilizarla después de INIT-OFFSET, INIT-GADJUST o INIT-SP300-GADJUST.</p>
HELLO	<p>Igual que MONO-RESET. Se utiliza para mantener la compatibilidad con las aplicaciones existentes.</p>
MODEL	<p>Devuelve el número del modelo del monocromador SpectraPro.</p> <p>POR EJEMPLO: MODELO DP-558</p>
SERIAL	<p>Devuelve el número de serie del monocromador SpectraPro. El formato es de 7 dígitos, siendo los 3 primeros el modelo #.</p> <p>POR EJEMPLO: SERIE 3060232</p>
INIT-GRATING	<p>Selecciona cuál de las tres rejillas instaladas irá después de encontrar 0.0 nm en la primera rejilla de la torreta instalado.</p> <p>POR EJEMPLO: 2-INIT GRATING selecciona la segunda rejilla como predeterminada.</p> <p>Acepta valores 1 - 9.</p>
INIT-WAVELENGTH	<p>Establece una longitud de onda inicial para el SpectraPro.</p> <p>POR EJEMPLO: 435.84 INIT-WAVELENGTH</p>
INIT-SRATE	<p>Establece una velocidad de escaneo inicial para el SpectraPro.</p> <p>POR EJEMPLO: 500.0 INIT-SRATE</p>

TABLA A.4: Comandos de calibración del grating

Una vez analizados todos los comandos, el objetivo es replicar las conversaciones con el monocromador ($PC \Leftrightarrow \text{Monocromador}$) de la siguiente manera: En primer lugar que se realice la conversación $PC \Leftrightarrow \text{microcontrolador}$. En segundo lugar la conversación $\text{microcontrolador} \Leftrightarrow \text{Monocromador}$.

Para la realización de este proyecto se utilizara el micro-controlador LPC2103 de NXP. Éste posee dos UART como periféricos, lo que nos permitirá la comunicación bidireccional entre el monocromador y el microcontrolador; y entre el PC y el microcontrolador.

La comunicación $\text{microcontrolador} \Leftrightarrow PC$ se realizará a través de un convertidor USB a serie FT232RL.

La comunicación $\text{microcontrolador} \Leftrightarrow \text{monocromador}$ se realizará a través del transceptor MAX232 para la adaptación de niveles TTL a niveles RS232.

A.3. Sensor óptico SI-440

El sensor óptico SI-440, es un detector de silicio diseñado para el rango comprendido desde el visible al infrarrojo cercano, lo correspondiente al uso en el rango de longitudes de onda entre 400 a 1080 nm⁵.

El detector está fabricado en silicio mejorado para el azul (hasta 400 nm) y opera en modo fotovoltaico sin polarización para obtener una buena eficiencia en relación señal a ruido.

La salida del detector se corresponde con una corriente negativa. El SI-440 puede, además, ser utilizado con sistemas de lectura preparados para operación de fotomultiplicador sin la necesidad de altos voltajes. El detector de silicio SI-440 es compatible directamente con la serie NCL de Acton y los sistemas SC-1.

La pre-amplificación para el SI-440 se puede encontrar en el NCL o el SC-1, los cuales permiten al ordenador la selección de la ganancia.

A.3.1. Instalación

El detector SI-440 se conecta directamente a la rejilla de salida de cualquiera de los monocromadores de la serie Acton.

Asegúrese de que el punto rojo en la carcasa del detector se encuentra en la parte superior y monte el detector con los cuatro tornillos suministrados. Coloque el conector BNC que corresponderá con la salida del fotodiodo.

A.3.2. Especificaciones

Las especificaciones del fotodiodo se pueden observar en la Tabla A.5, calculadas para 22 °C.

⁵Dichos rangos de funcionamiento quedan marcados, sobre todo, por el material de fabricación del fotodiodo.

Área activa	100 mm ²
Diámetro activo	0.444 inches
Responsividad @ 254nm	0.1 mín, 0.14 A W ⁻¹ tip
Capacidad de la unión @ 0 V	4500 pF
Resistencia Shunt	10 MΩ
NEP:	$2.5 \times 10^{-13} \text{ W/Hz}^{1/2}$
Tiempo de subida	5.9 μs
Corriente de saturación:	0.2 mA

TABLA A.5: Especificaciones para el sensor

La curva de respuesta típica del fotodiodo se puede apreciar en la Figura A.15. La respuesta del SI-440 corresponde con la curva de línea a rayas. Para obtener mayor precisión, existe la posibilidad de realizar una calibración espectral del sensor. Ésto evitará errores de calibración por fabricación o por envejecimiento.

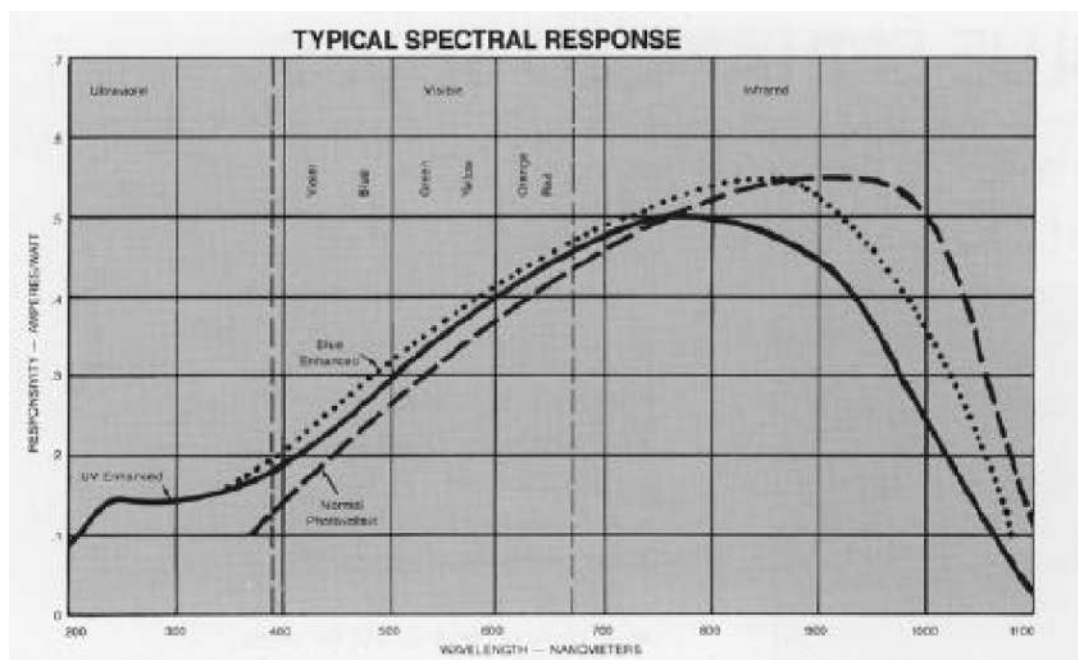


FIGURA A.15: Rango de resolución del sensor SI-440

A.4. Controlador de temperatura HTC-1500

En la Figura A.16 se muestra el circuito integrado *HTC-1500*. Es un controlador de temperatura basado en un control automático PI, capaz de proporcionar ajustes de temperatura con estabilidades de 0.0009 °C.

Este controlador será el encargado de controlar el módulo termoelectrico perteneciente al soporte de diodos *LDM4407*. Posteriormente se entrará en más detalle en el apartado A.6.

El *HTC-1500* proporciona un amplio rango de configuraciones para el usuario. Éstas son, entre otras, la posibilidad de selección de la constante integral y la ganancia proporcional del bucle de realimentación PI. Gracias a la posibilidad de selección de dichas

configuraciones, obtendremos un resultado óptimo del tiempo de respuesta y la amortiguación del sistema, dando un amplio rango para evitar la oscilación del mismo. Además, podemos modificar fácilmente el punto de operación del sensor de temperatura integrado también en el *LDM4407*. Este integrado está diseñado para una operación simple con un sensor de temperatura resistivo pero no se limita a este único caso.

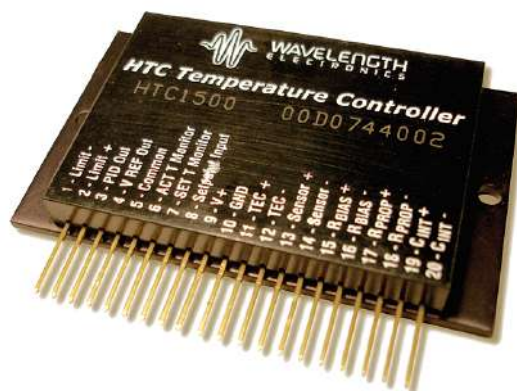


FIGURA A.16: Controlador de temperatura HTC-1500

A.4.1. Funcionamiento y descripción

El controlador de temperatura *HTC-1500* se basa principalmente en un controlador de temperatura automática basado en PID, o un bucle de control realimentado de Ganancia proporcional + Integrador + Derivador. Éste calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado, con la intención de establecer el valor final con un error menor de 0.0009°C .

El uso del PID para el control no garantiza un control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo, por lo que algunos de los parámetros del control, son dependientes de los componentes a los que se conecte este controlador. El fabricante deja dichos parámetros a elección del usuario. Éstos, serán los que se seleccionen para evitar, tanto que el controlador sea muy lento como que oscile.

Los controladores PID se pueden llamar también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido; y la ausencia del proceso integral, puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control. En el apartado de diseño se explica la razón por la que se escogen los valores para la constante de tiempo integral y la ganancia proporcional.

En la Figura A.17 podemos ver el esquema de conexión rápida de los elementos con los que funciona este controlador de temperatura.

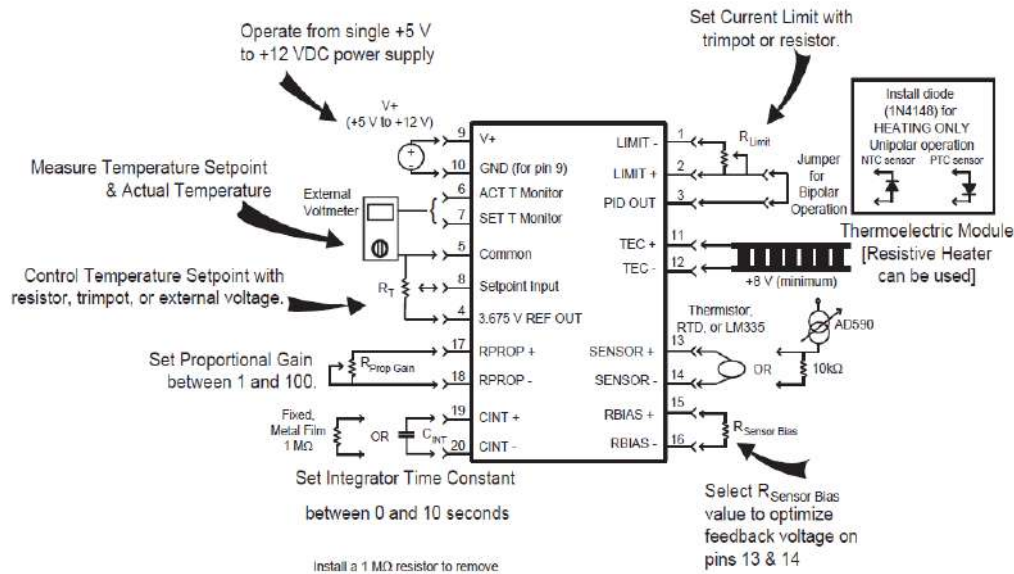


FIGURA A.17: Conexión rápida del HTC

A.4.2. Estructura interna del HTC-1500

En la Figura A.18 se puede ver la estructura interna del HTC. Dentro la misma se pueden apreciar marcadamente las distintas partes de las que se compone. Los pines de la izquierda corresponden con la selección del control de temperatura, los de la parte superior de la figura corresponden con el control del bucle PI y los de la derecha se corresponden con las fuentes de corriente de salida para el módulo termoelectrico y polarización del sensor de temperatura.

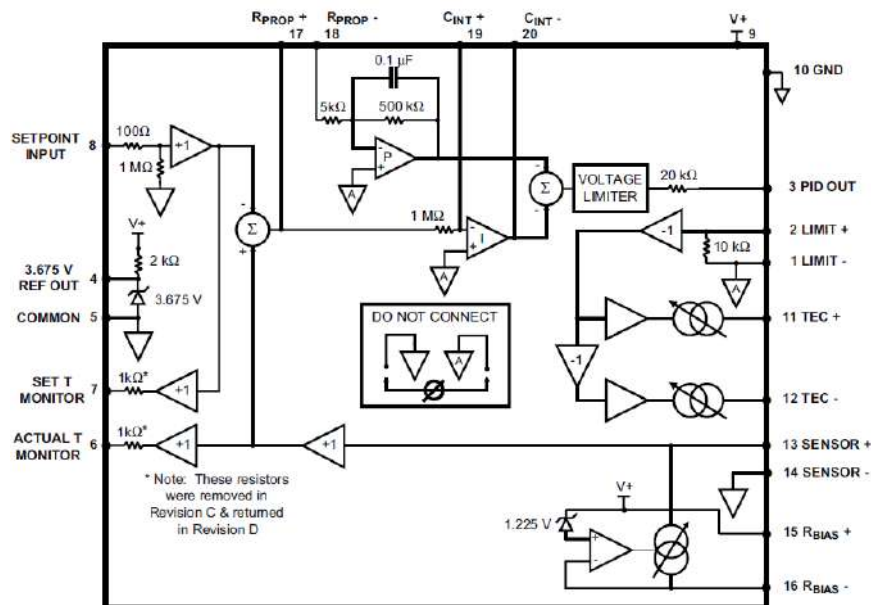


FIGURA A.18: Diagrama de bloques internos del HTC

En la Tabla A.6 se describe la funcionalidad de cada uno de los pines del controlador de temperatura.

Descripción de los pines del HTC		
Nº PIN	PIN	FUNCIÓN
1	LIMIT-	Resistencia de valor entre 0 y 1 MΩ que limita la máxima corriente de salida
2	LIMIT+	
3	PID OUT	Cortocircuitar los pines 2 y 3 para una operación bipolar. Colocar un diodo para trabajar en unipolar.
4	V REF OUT	Tensión de referencia de 3.675 V. Estabilidad <50ppm
5	COMMON	Tensión de tierra. Cortocircuitado internamente con el pin 10.
6	ACT T MONITOR	Monitor de temperatura. Medición de la tensión entre los pines sensor + y sensor -
7	SET T MONITOR	Muestra el valor de la tensión introducida en setpoint input
8	SETPOINT INPUT	Punto de establecimiento de la temperatura. Impedancia de entrada de 1 MΩ
9	V+	Entrada de alimentación. De +5 V a +12 V
10	GND	Tierra del integrado. Utilizada con el pin 9 para altas corrientes de retorno.
11	TEC+	Fuente de corriente para el módulo termoelectrico. En caso de tener un sensor NTC, conectar TEC+ al terminal positivo del módulo. En el caso de que sea PTC, conectar TEC- al terminal positivo.
12	TEC-	
13	SENSOR+	Conexión con el sensor de temperatura. Fuente de corriente de polarización para el sensor de temperatura.
14	SENSOR-	
15	RBIAS+	La resistencia entre estos pines selecciona la corriente del sensor entre 1 μA a 10 mA. Rango entre 0 y 1 MΩ
16	RBIAS-	
17	RPROP+	La resistencia entre estos pines selecciona la ganancia proporcional del PI entre 1 y 100. Rango entre 0 y 495 kΩ
18	RPROP-	
19	CINT+	La capacidad entre estos pines selecciona la constante de tiempo integral del PI entre 0 y 10 s. Para 0 Segundos (OFF) = resistencia de 1 MΩ. Entre 0 y 10 s colocar capacidades entre 0.1 μF y 10 μF
20	CINT-	

TABLA A.6: Descripción detallada de los pines del integrado

A.4.3. Elección de los componentes para el HTC

Corriente límite de polarización - Pines 2 y 3: Mediante los pines 2 y 3 del integrado se establecerá el modo de funcionamiento, unipolar o bipolar dependiendo del caso que interese.

Ya que disponemos de un módulo termoelectrico, y éste tiene tanto la capacidad de calentar como de enfriar el láser, utilizaremos el modo bipolar. Esta configuración se consigue simplemente cortocircuitando los pines 2 y 3 como se propone en la Figura A.19.

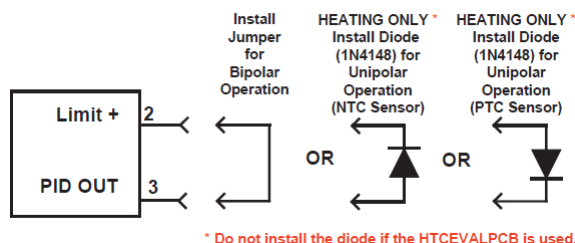


FIGURA A.19: Conexión necesaria para modo bipolar

Corriente límite de salida - Pines 1 y 2: La corriente de salida de alimentación del módulo termoelectrico, se limita introduciendo una resistencia en el diseño entre los pines 1 y 2 de tal manera que cumpla la Ecuación A.1.

$$R_{LIMIT} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{\frac{4,5}{I_{LIMIT}} - 3} \quad (\text{A.1})$$

Dada esta ecuación, se obtiene una relación de la corriente de salida con la resistencia situada entre las patillas 1 y 2. Se puede obtener, por lo tanto, el valor de la resistencia a colocar entre estas patillas, una vez escogido el valor de la corriente límite de alimentación del módulo termoelectrico. Para el caso del diseño, la corriente límite es de 1 A, por lo que la resistencia a colocar es de aproximadamente 13.3 kΩ.

Para simplificar el diseño se fija una resistencia de 10 kΩ que se ajusta a corrientes de hasta 0.9 A, entrando siempre en el rango de operación seguro del diseño; el cual se puede ver en la Figura A.20.

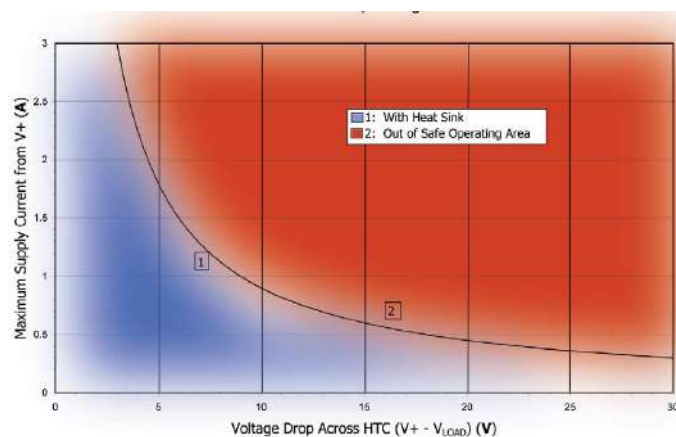


FIGURA A.20: Rango de funcionamiento seguro del HTC, SOA

En concreto, para la situación de este proyecto, podemos calcular un rango de operación mas detallado si se visita la URL del fabricante.

Una vez en la página, introducimos los parámetros del diseño y obtenemos la curva particular de operación, Figura A.21.

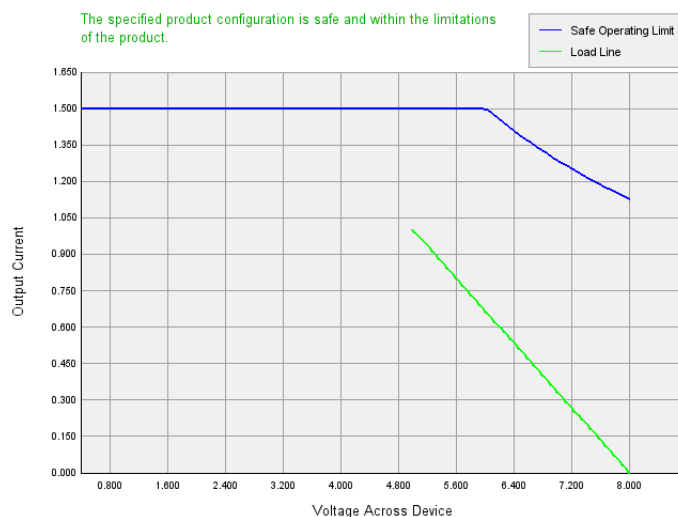


FIGURA A.21: Rango de funcionamiento de nuestro HTC

La Figura A.22 representa el conexionado propuesto de los pines 1 y 2 del circuito.

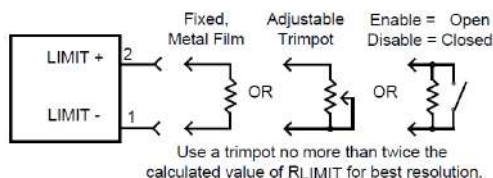


FIGURA A.22: Conexión para corriente límite de salida

Corriente de polarización del sensor - Pines 15 y 16: Dependiendo del tipo de sensor de temperatura se necesita una corriente de polarización inferior o superior. El *HTC* nos permite rangos de polarización desde los 10 μA a los 10 mA, por lo que podremos utilizar un amplio rango de diversos sensores de temperatura.

En el caso del proyecto, el sensor de temperatura será un sensor termistor *NTC*. Los rangos de polarización de los termistores varían entre los 10 μA y los 100 μA . En concreto, el que incluye el módulo de adaptación de diodos láser, es como ya se ha descrito un termistor *NTC*, de resistencia 10 k Ω @ 25 °C. La corriente óptima de polarización elegida para este sensor es de 100 μA . Para conseguir esta corriente es necesario fijar un valor de la resistencia entre los pines 15 y 16 que cumplan las condiciones de la Ecuación A.2.

Para mayor información sobre el sensor leer el apartado A.6.

$$R_{BIAS} = \frac{1,225}{I_{BIAS}} - 122 \quad (\text{A.2})$$

Teniendo en cuenta esta ecuación, la elección de la resistencia nos da un valor aproximado de 12 k Ω .

El conexionado realizable se puede apreciar en la Figura A.23.

En este caso, no se selecciona un potenciómetro, ya que no se pretende cambiar el sensor de temperatura. Dicho sensor, está integrado en el módulo de montaje de diodos láser visto en el apartado A.6.

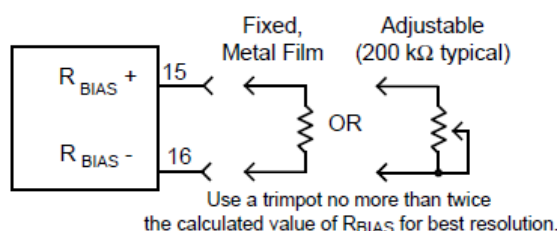


FIGURA A.23: Conexión para corriente de polarización del sensor

Sensor - Pines 13 y 14: La conexión con el sensor de temperatura se realiza entre los pines 13 y 14 como se aprecia en la Figura A.24. El sensor pertenece al módulo de montaje de diodos láser *LDM4407*, por lo que se entrará en más detalle en el apartado A.6.

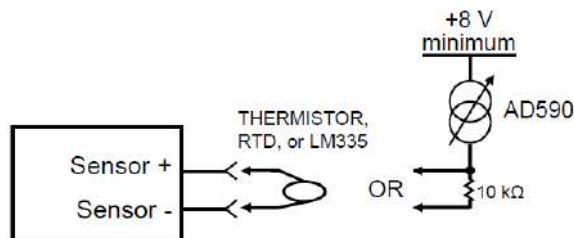


FIGURA A.24: Conexión del sensor

Ganancia Proporcional - Pines 17 y 18: Como se puede ver en la Figura A.25, entre los pines 17 y 18, se colocará una resistencia con la que se obtiene el término de ganancia proporcional del bucle PI del sistema. Se puede ver claramente que forma parte de este bucle en la Figura A.18. La resistencia que se coloque entre estos pines, quedará en serie con la resistencia de 5 kΩ del amplificador operacional, encargado del termino de ganancia proporcional (Amplificador P).

Analizando el circuito del amplificador, se obtiene la ecuación proporcionada por el fabricante, Ecuación A.3.

$$R_{PROP} = \frac{500 \text{ k}\Omega}{GAIN} - 5 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.3})$$

Teniendo en cuenta esta ecuación, se puede obtener la resistencia adecuada para cada ganancia. El fabricante propone que una ganancia de 33 es un valor adecuado para probar en un diseño experimental. En primera instancia, esta ganancia será la escogida, para colocar una resistencia. Hay que tener en cuenta que en cualquier sistema realimentado, pueden suceder dos cosas dependiendo de la velocidad de establecimiento:

- Puede conseguirse un tiempo de establecimiento adecuado si los parámetros se escogen adecuadamente.
- También puede que el tiempo de establecimiento no sea el que nos interesa. Esto se debe a que si el termino proporcional es demasiado pequeño, el valor final se alcanza muy despacio. Por el contrario, si el término proporcional es muy grande, el sistema puede llegar incluso a oscilar.

Esta última condición, obliga a que en el diseño físico, la resistencia encargada del termino proporcional (R_{PROP}) se implemente con un potenciómetro. Des esta manera, se proporciona un amplio rango de ganancias y se cubren posibles errores de diseño.

De cualquier forma, el valor que se fijará inicialmente para la resistencia, será para una ganancia de 33 como se propone. El valor de la resistencia cumpliendo la Ecuación A.3 es de aproximadamente 10 kΩ.

El potenciómetro utilizado será un potenciómetro de 200 kΩ, con el que se consigue un rango de ganancias desde 2.43 para 200 kΩ, hasta ganancias de 100 con 0 Ω.

NOTA: Si se desea modificar el término proporcional, es necesario hacerlo cuando la salida esté apagada.

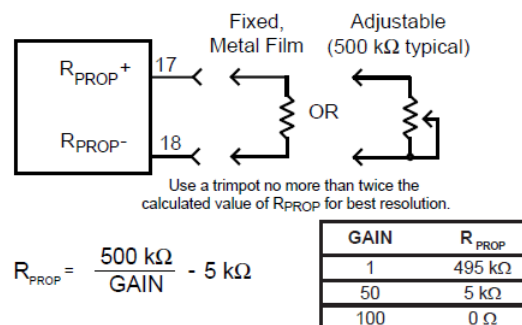


FIGURA A.25: Configuración para la resistencia de la ganancia proporcional

Constante de tiempo integral - Pines 19 y 20: Al igual que la constante proporcional, la constante integral permite ajustar los parámetros característicos del bucle PI. Como se puede ver en la Figura A.18 los pines 19 y 20 alojan un condensador en el bucle de realimentación negativa del amplificador operacional (configuración típica de un amplificador integrador). Por este motivo, el condensador C_{INT} es el encargado de modificar el término integral del bucle PI.

La relación de capacidad para el tiempo de integración se puede ver en la Figura A.26, así como en la Ecuación A.4.

$$C_{INT} = \frac{T_{INT}}{1 \text{ M}\Omega} \quad (\text{A.4})$$

De la Figura A.18, podemos apreciar que si se sustituye el condensador por una resistencia de $1 \text{ M}\Omega$, la configuración integradora del sistema se convierte en una configuración amplificadora de ganancia 1; por lo que desaparecería el término integral. El control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el término proporcional.

El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. En otros casos, se puede prescindir de este bloque, pero para mayor estabilidad, se establece el valor del condensador a $1 \mu\text{F}$ para obtener así un tiempo integral de 1 s.

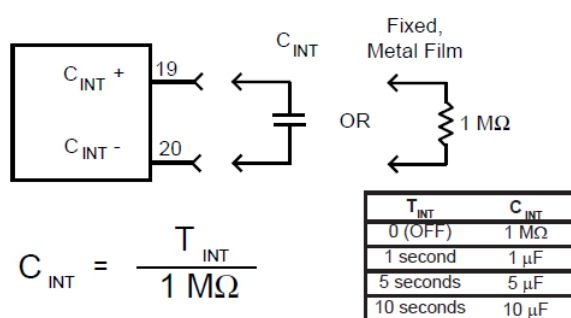


FIGURA A.26: Configuración de la constante de tiempo integral

Punto de selección de temperatura - Pines 8 y 5 (Pin 4 opcional): La temperatura de operación del láser se controla en estos pines mediante una tensión, obtenida en el diseño por medio de un Convertidor Digital a Analógico o ADC. Entre estos pines vamos a poder seleccionar la temperatura vía software, de forma que se cumpla la Ecuación A.5.

La tensión en la patilla *Setpoint Input*, para una determinada temperatura, tiene que ser la misma que proporcionaría el sensor a dicha temperatura. Para ello, hay que tener en cuenta que la corriente de polarización del sensor escogida en el punto A.4.3 es de $100 \mu\text{A}$. La tensión del punto de operación tendrá que cumplir la Ecuación A.6.

$$V_{SET} = R_{Th} * I_{BIAS} \quad (\text{A.5})$$

$$V_{SET} = R_{Th} * 100 \mu\text{A} \quad (\text{A.6})$$

Como se puede ver en la Figura A.27, la conexión para la selección de temperatura se realiza entre las patillas 5 y 8. En el caso del proyecto actual, este voltaje se consigue mediante el *ADC*, pero el *HTC* da la posibilidad de establecerlo mediante un divisor de tensión adaptado a la patilla 4 (referencia de tensión, 3.675 V). Por este último motivo la utilización del pin 4 es opcional.

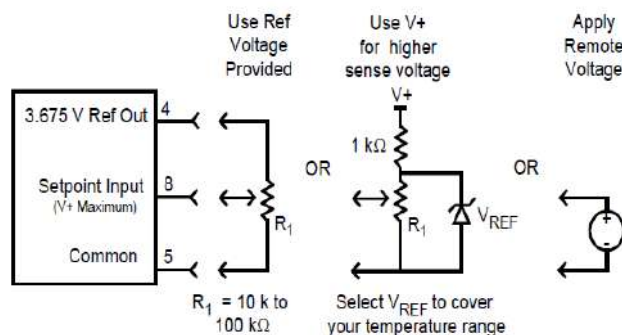


FIGURA A.27: Establecimiento de la temperatura

Salida del módulo termoelectrico - Pines 11 y 12: Como se puede apreciar en la Figura A.28, el módulo termoelectrico se conecta a los pines 11 y 12 del *HTC*. En los pines correspondientes de la Tabla A.6, se puede ver que si se tiene un sensor NTC (como es el caso del proyecto), se tiene que conectar TEC+ al terminal positivo del módulo termoelectrico. El terminal TEC-, por lo tanto, se tiene que conectar al terminal negativo del módulo termoelectrico. La corriente de este modo circula desde TEC+ a TEC- cuando el módulo se está enfriando y de TEC- a TEC+ cuando se caliente. Como se ve en la Figura A.28, se puede conectar en serie de forma opcional un amperímetro para medir la corriente que atraviesa dicho módulo.

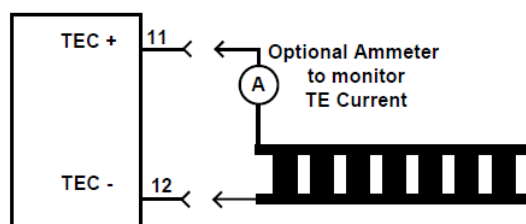


FIGURA A.28: Conexión con el módulo termoelectrico

Una vez seleccionados todos los parámetros que el fabricante deja a libre elección, se procederá al diseño Hardware del proyecto que no forma parte del contenido de las prácticas. Para mayor información sobre el circuito integrado del *HTC*, leer el manual del fabricante [21].

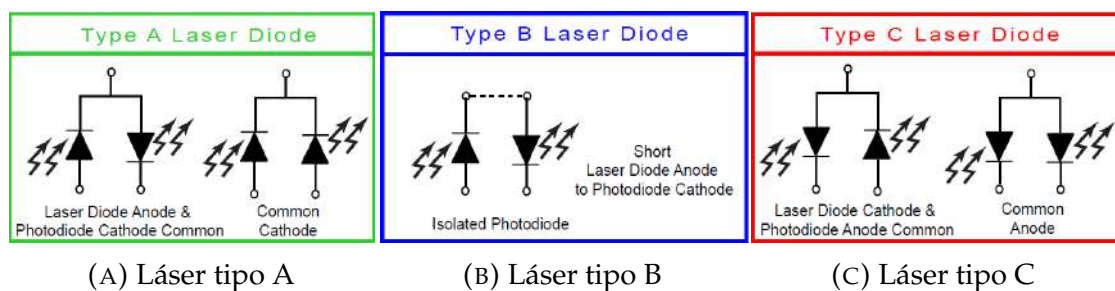


FIGURA A.30: Tipos de láser

El circuito integrado del *LDD* posee en el encapsulado dos controles ajustables, correspondientes a dos resistencias variables internas, con los que se puede modificar o establecer el límite de corriente Hardware para el diseño. Gracias a esto, se evitarían posibles daños al diodo láser por exceso de potencia. Este integrado posee también pines de salida, con los que se podrá realizar monitorización constante tanto de potencia como de corriente.

Podemos ver una descripción detallada de los pines y la función que desempeñan en la Tabla A.7.

Descripción de los pines del LDD		
Nº PIN	PIN	FUNCIÓN
1	CURRENT MONITOR	Mide la corriente proporcionada al diodo láser. Rango de 0 a 2.5V
2	POWER MONITOR	Mide la corriente del fotodiodo. Rango de 0 a 2.5V
3	MOD INPUT	Entrada de modulación [invertida]. Rango de 0 a 5V
4	GND	Tensión de tierra.
5	LD CATHODE	Cátodo del diodo láser
6	LD ANODE	Ánodo del diodo láser. Cortocircuitado internamente con el pin 8.
7	PD ANODE	Ánodo del fotodiodo
8	V+	Entrada de alimentación. Rango de +5V a +12.5V

TABLA A.7: Descripción detallada de los pines del integrado

Al igual que en el caso anterior, en el *LDD* también tenemos unos requisitos para operar en el rango apropiado de potencia. Este rango se puede ver en la Figura A.31.

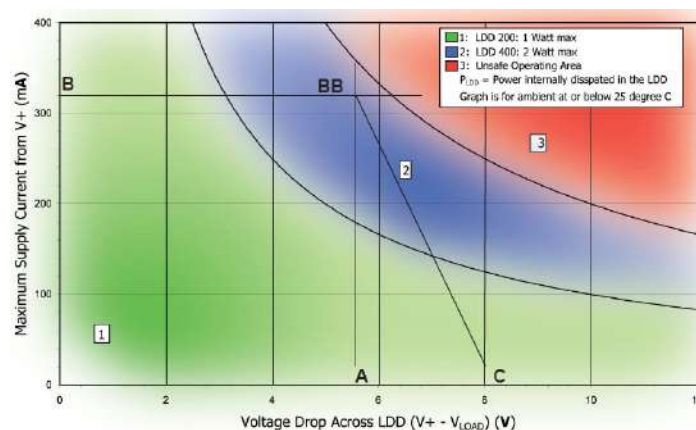


FIGURA A.31: Rango de funcionamiento seguro del LDD, SOA

Dado que nuestro sistema es el de 100 mA, el rango de operación se ha calculado mediante el script proporcionado por el fabricante [23].

Para el caso en el que desarrolla el proyecto, el driver de diodos láser es el modelo 100-1P, que es un modelo desactualizado, y por lo tanto, no hay un calculador exacto. A pesar de este problema, se puede utilizar el del modelo 200 limitando la corriente de salida a 100 mA.

Teniendo en cuenta este cambio e introduciendo los parámetros de diseño (al igual que se hizo con el *HTC*), podemos ver el resultado en la Figura A.32.

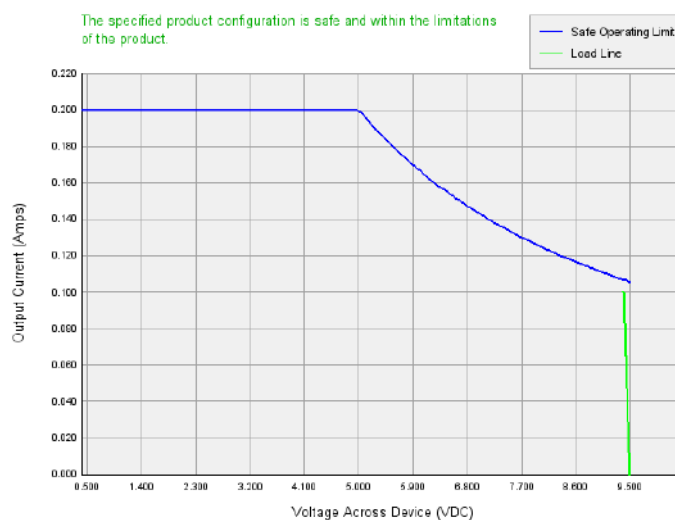


FIGURA A.32: Rango de operación particular del LDD

Teniendo en cuenta que este circuito opera de dos modos distintos, y para minimizar la posibilidad de dañar el diodo láser o el propio integrado, hay que seguir unos pasos propuestos de operación. Es importante que si se cambia el diodo láser, se repitan los cálculos de los parámetros del diodo, con las ecuaciones de las especificaciones. A continuación se vuelve a realizar los pasos propuestos con el fin de no dañar ningún componente. Éstos son:

1. Calcular los parámetros de operación segura del diodo.
2. Seleccionar el modo de operación
 - Modo de potencia constante
 - a) Conectar el LDD de la forma que se especificaba en el apartado A.5.2
 - b) Seguir los pasos propuestos en el mismo apartado.
 - Modo de corriente constante
 - a) Conectar el LDD de la forma que se especificaba en el apartado A.5.3
 - b) Seguir los pasos propuestos en el mismo apartado.

A.5.2. Modo de operación en potencia constante

En el modo de potencia constante, el LDD proporciona una excelente estabilidad de potencia para el diodo láser.

El conexionado para obtener este tipo de modo lo podemos ver en la Figura A.33.

En este modo, el funcionamiento del LDD, pretende que la corriente que genera el fotodiodo sea constante. Así se consigue una potencia estable en la emisión láser. De esta manera, la corriente del fotodiodo, será proporcional a la potencia óptica de emisión del diodo láser.

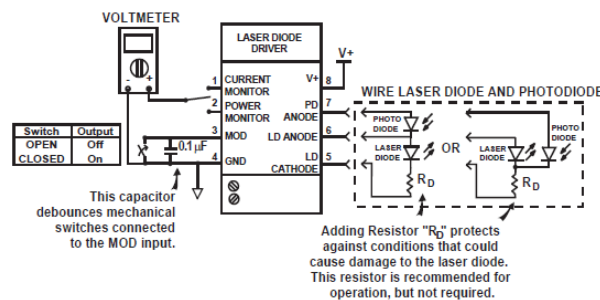


FIGURA A.33: Configuración del LDD en modo potencia constante

Los pasos a seguir para no dañar los dispositivos en el modo de potencia constante son los que siguen:

1. Con la fuente de alimentación apagada, girar al menos 12 veces el potenciómetro de AJUSTE DE LA CORRIENTE DE SALIDA, en el sentido de las agujas del reloj.
2. Girar al menos 12 veces el potenciómetro de AJUSTE DE LA CORRIENTE LÍMITE, en sentido contrario a las agujas del reloj.
3. Unir los pines 3 - 4 y conectar la alimentación.
4. Ajustar la corriente límite del diodo láser. Para ello, giramos lentamente el potenciómetro AJUSTE DE LA CORRIENTE LÍMITE, hasta que en el Pin 1 se lea V_{LIMIT} . La tensión V_{LIMIT} se calcula como: $V_{LIMIT} = I_{LIMIT} * (\frac{2.5V}{100mA})$, donde I_{LIMIT} es la corriente límite del diodo láser calculada en las especificaciones del fabricante.

5. Una vez establecida la corriente límite del diodo láser, hay que ajustar la corriente del fotodiodo, para ello usaremos la ecuación $V_{Pin2} = I_{Pd} * 1000 \mu A V^{-1}$, donde I_{Pd} es la corriente de monitorización del diodo láser.
6. Una vez calculada la tensión en el Pin2, realizaremos el ajuste del potenciómetro AJUSTE DE LA CORRIENTE DE SALIDA. Para ello, girar al menos 12 veces el tornillo del potenciómetro, en el sentido contrario de las agujas del reloj.
7. Colocar la entrada positiva del voltímetro en el Pin2 y la negativa en el Pin4. Seguidamente, girar lentamente el potenciómetro AJUSTE DE LA CORRIENTE DE SALIDA, hasta que la tensión en el Pin2 sea la calculada en el paso 5.

A.5.3. Modo de operación en corriente constante

En la Figura A.34, se puede ver la configuración del integrado LDD en modo corriente constante. En este modo el circuito proporciona una corriente constante entre el ánodo y el cátodo del diodo láser. Obtendremos, además, una óptima estabilidad en longitud de onda.

Al igual que en el modo de potencia constante, en este modo el fabricante propone unos pasos a seguir:

1. Con la fuente de alimentación apagada, giramos al menos 12 veces, el potenciómetro de AJUSTE DE LA CORRIENTE DE SALIDA, en el sentido de las agujas del reloj.
2. Girar al menos 12 veces el potenciómetro de AJUSTE DE LA CORRIENTE LÍMITE, en el sentido contrario a las agujas del reloj.
3. Unir los pines 3 - 4 y conectar la alimentación.
4. Ajustar la corriente límite del diodo láser. Para ello, giramos lentamente el potenciómetro AJUSTE DE LA CORRIENTE LÍMITE, hasta que el Pin 2 se lea V_{Limit} . La tensión V_{Limit} se calcula como: $V_{Limit} = I_{Limit} * \frac{2.5 V}{100 mA}$, donde I_{Limit} es la corriente límite del diodo láser.
5. Una vez ajustada la corriente límite, ajustaremos la corriente del diodo láser. Para ello, comenzamos girando el potenciómetro AJUSTE DE LA CORRIENTE DE SALIDA, al menos 12 veces en sentido contrario a las agujas del reloj.
6. Calcular mediante la fórmula $V_{Pin2} = I_{Op} * \frac{2.5 V}{100 mA}$, la tensión correspondiente a la corriente de operación del diodo láser.
7. Una vez calculada la V_{Pin2} para I_{Op} , giramos lentamente el potenciómetro AJUSTE DE LA CORRIENTE DE SALIDA, hasta que en el Pin2 se lea la tensión calculada en el paso 6.

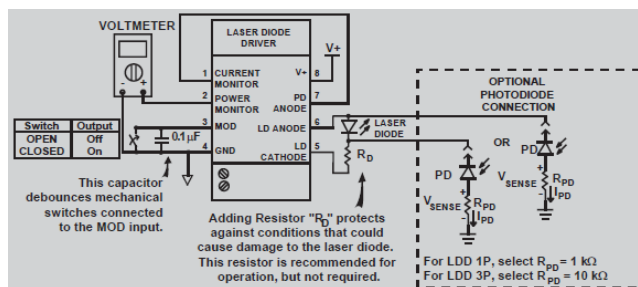


FIGURA A.34: Configuración del LDD en modo corriente constante

Para mayor información sobre el circuito integrado del *LDD*, consultar el manual del fabricante[22].

A.6. Soporte para diodos láser con control de temperatura LDM4407



FIGURA A.35: Soporte para diodos láser

A.6.1. Funcionamiento y descripción

El soporte para diodos láser, Figura A.35, se compone principalmente de tres partes.

- Montura para diodos láser.
- Módulo termoelectrónico.
- Sensor de temperatura.

Todos estos componentes se pueden apreciar en la Figura A.36 y se entrará más en detalle en los siguientes puntos.

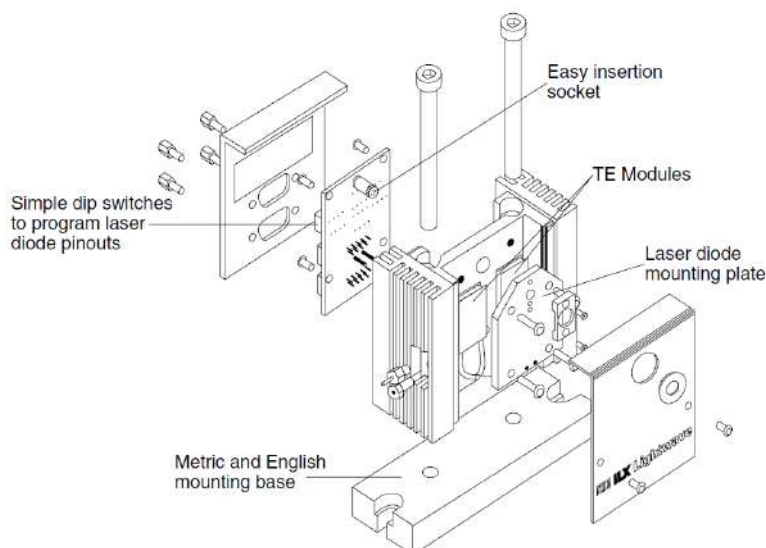


FIGURA A.36: Estructura interna del soporte para diodos láser

A.6.2. Configuración de la montura

El *LDM* acepta múltiples configuraciones de diodos láser y múltiples tipos de encapsulados. Para seleccionar el tipo de configuración que se desea, es necesario realizar la configuración adecuada de los interruptores internos que posee la montura. En la Figura A.37 se pueden ver los interruptores internos que posee la montura así como los pines de conexión para los diodos.

En la Tabla A.8 podemos ver la posición de los interruptores dependiendo del tipo de encapsulado de láser que queramos introducir. Será necesario revisar este punto cada vez que se realice un cambio del diodo láser a analizar

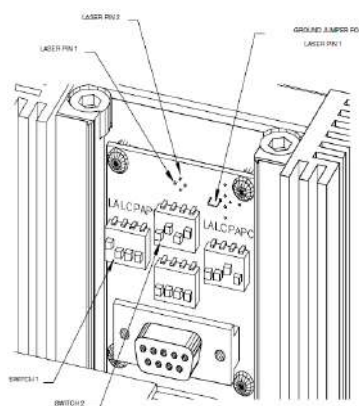


FIGURA A.37: Configuración de los interruptores internos

Configuración de los Pines				Configuración de los interruptores			
1	2	3	4	1	2	3	4
LC	LA/PC	PA	none	2	1,4	3	none
LA	LC/PC	PA	none	1	2,4	3	none
PA	LA/PC	LC	none	3	1,4	2	none
LC	PA	LA/PC	none	2	3	1,4	none
LA	LC/PA	PC	none	1	2,3	4	none
LC	LA	PA	PC	2	1	3	4
LC	PC	PA	LA	2	4	3	1
LA	PC	PA	LC	1	4	3	2

LA = Laser Anode (Posición 1 de cada interruptor)
 LC = Laser Cathode (Posición 2 de para cada interruptor)
 PA = Photodiode Anode (Posición 3 de cada interruptor)
 PC = Photodiode Cathode (Posición 4 de cada interruptor)

TABLA A.8: Tabla de configuración de los interruptores

A.6.2.1. Instalación del diodo

El LDM tiene la posibilidad de instalar dos tipos de encapsulados, estos son:

- Encapsulado *window-can* de 5.6 mm y 9.0 mm, Figura A.38a.
- Encapsulado *large flanged* de 11 mm × 16 mm y 14 mm × 20 mm

La instalación de estos dos diodos sobre el módulo la podemos ver detallada en las Figuras A.38, Figura A.38b.

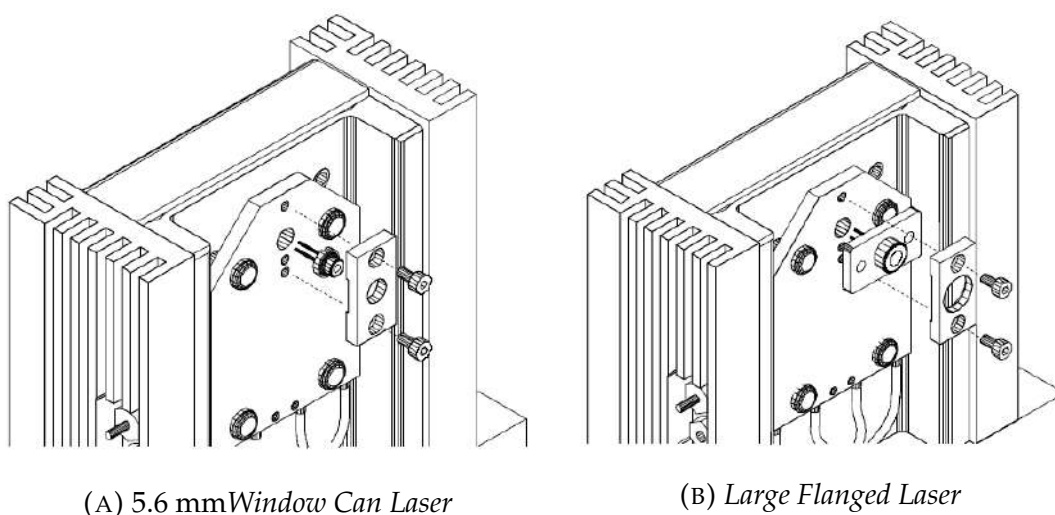


FIGURA A.38: Instalación de los dos tipos de encapsulados láser

A.6.3. Módulo termoelectrónico

Gracias a este dispositivo termoelectrónico, se garantiza la posibilidad de controlar en cada momento la temperatura a la que está trabajando el láser.

El beneficio de que sea un módulo termoelectrico y no una simple resistencia de calefactor, nos proporciona tanto la posibilidad de calentar como la de enfriar, con la simple modificación de alternar el sentido de la corriente.

Este módulo termoelectrico, como se puede ver en la Figura A.36, no es un solo módulo sino que son dos módulos Peltier cuyas características se especifican en la Tabla A.9.

Módulo Termoelectrico	
Q_{max}	28 W (2 @ 14 W)
ΔT_{max}	70 °C
I_{max}	6 A
V_{max}	8 V

TABLA A.9: Características del módulo termoelectrico

A.6.4. Sensor de temperatura del LDM

El soporte para diodos LDM posee un sensor de temperatura para la regulación térmica del módulo. Este sensor, es un sensor NTC *Negative Temperature Coefficient*.

Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia del semiconductor debido al cambio de la temperatura a medir, creando una variación en la concentración de portadores. Para los NTC, al aumentar la temperatura, aumentará también la concentración de portadores, por lo que la resistencia será menor. Motivo por el cual el coeficiente es negativo.

El sensor que proporciona el módulo de soporte de diodos LDM es, como ya se ha dicho, un NTC de 10 k Ω @ 25 °C.

El módulo encargado del control, tanto de la temperatura como de leer los valores que nos proporciona el sensor de temperatura, será el HTC. Como se describió en el apartado respectivo al HTC A.4, la polarización del sensor de temperatura será de 100 μ F, y el rango máximo de temperaturas que se logran con este módulo y sin refrigeración por nitrógeno, es de 0 °C a 70 °C. Es un rango que no podremos cubrir, ya que este módulo está preparado para una inyección de corriente de hasta 6 A y nuestro módulo de control de temperatura HTC, solo es capaz de proporcionar 1.5 A. Concretamente está calibrado para 1 A por seguridad de sobrecalentamiento.

El uso de sensores de temperatura NTC para el control de diodos láser es una buena técnica, ya que la respuesta de éstos es muy rápida. Además tienen un coste muy bajo y alta sensibilidad. El mayor inconveniente de estos tipos de sensores, es que dada su naturaleza no tienen un comportamiento lineal, sino que tienen un comportamiento exponencial y por ello conviene realizar una calibración previa de los mismos.

Para obtener la expresión de estos sensores se puede realizar la linealización en torno a un punto, lo que nos aporta una respuesta con muy poco margen.

El otro método, y el seguido en el proyecto, será la caracterización por medio de ecuaciones exponenciales que nos dan la relación de la resistencia en función de la temperatura.

Estas ecuaciones las podemos obtener gracias a las ecuaciones de *Steinhart-Hart* (Ecuación A.7), que presentan un modelo de la resistencia de los semiconductores a cada temperatura.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln(R))^3 \quad (\text{A.7})$$

Siendo las constantes:

- **T:** Temperatura en Kelvin
- **R:** Resistencia a dicha temperatura en ohmios
- **A,B,C:** Coeficientes de *Steinhart-Hart*, cuya variación depende del tipo y modelo del sensor que se utilice y del rango de temperaturas de interés

Dado que en el diseño lo que interesa es la resistencia, despejando de la Ecuación A.7, se obtiene la siguiente Ecuación A.8

$$R = \exp\left(\sqrt[3]{y - \frac{x}{2}} - \sqrt[3]{y + \frac{x}{2}}\right) \quad (\text{A.8})$$

$$x = \frac{1}{C}\left(A - \frac{1}{T}\right)$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{B}{3C}\right)^3 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}$$

En el caso del sensor incluido en el módulo, termistor Dale 1T1002-5 de ILX Lighthouse, los coeficientes nos los proporciona el fabricante. De esta forma, se puede realizar una calibración matemática o comparar los valores que ofrece el fabricante en la tabla de calibración:

- $A = C_1 10^{-3}$ con $C_1 = 1,1120$
- $B = C_2 10^{-4}$ con $C_2 = 2,3498$
- $C = C_3 10^{-7}$ con $C_3 = 1,0009$

Asumiendo una buena calibración del sensor, con la ecuación de *Steinhart-Hart* se introduce un error menor de 0.01°C para un rango de temperatura de 0°C a 50.5°C y un rango de resistencias para estos valores de $31.96\text{ k}\Omega$ y $3.58\text{ k}\Omega$. La tabla de calibración de este sensor la podemos encontrar en el Apéndice C del trabajo.

A.6.5. Conexiones

El módulo LDM posee dos conectores tipo DB9. Para poder interactuar con él, es necesario saber a qué corresponde cada pin. En las Figuras A.39 se pueden ver los dos tipos de conectores que posee el módulo, en concreto el DB9M Figura A.39a y el DB9F Figura A.39b. El conector hembra se encargará del control de la emisión láser, mientras

que el macho, se encargará del control (medida o establecimiento) de la temperatura. Ambos conectores se comunicarán directamente con el *LPC2103*, encargado del control de todos los módulos del sistema.

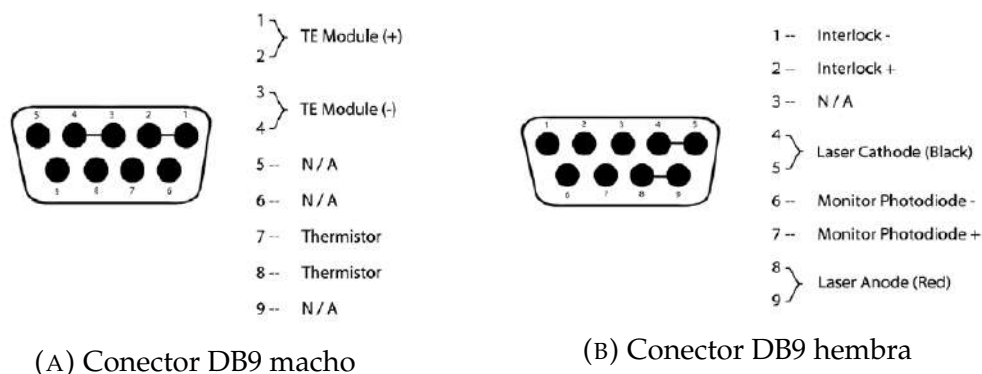


FIGURA A.39: Conectores para comunicación

A.7. Amplificador de corriente HMS564



FIGURA A.40: Imagen del amplificador

El amplificador de corriente *HMS564* o más bien, preamplificador de corriente, se puede ver en la Figura A.40.

Es un dispositivo o bloque de ganancia utilizado normalmente con fotomultiplicadores, detectores de fotodiodo y otros tipos de fuentes de corriente que necesiten de un transductor.

La salida de un fotodiodo es una corriente fotogenerada que recorre la dirección del ánodo al cátodo. Este amplificador de corriente está preparado para que se conecte directamente (mediante un cable BNC) a la salida del fotodiodo del monocromador, de tal forma que el amplificador quede conectado tal y como se ve en la Figura A.41. De esta manera, la entrada del preamplificador será la corriente fotogenerada del fotodiodo, y la salida será una tensión proporcional dependiente de la ganancia seleccionada entre 0 V y -10 V.

En la Figura A.41 también se puede apreciar que la conexión exterior del conector BNC corresponde con la polarización inversa del fotodiodo. Gracias a esto, el *HMS* permite

polarizar el fotodiodo fácilmente, tan solo con girar el potenciómetro que corresponde a la resistencia variable del circuito.

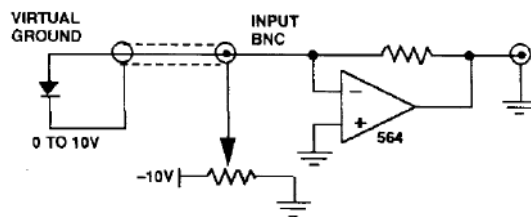


FIGURA A.41: Esquema principal del HMS

A.7.1. Funcionamiento y estructura interna del HMS564

En la Figura A.42 se puede observar el comportamiento interno de este amplificador de corriente de forma más detallada que en la Figura A.41.

En primer lugar, se encuentra a la entrada del preamplificador la polarización del fotodiodo conectada al terminal exterior del BNC. Por otro lado, conectado al terminal interno del BNC, se encuentra una etapa amplificadora de corriente, encargada de convertir la corriente en tensión por medio de la resistencia denominada R_F . Gracias a esta resistencia variable tendremos unas ganancias entre 10^4 y 10^8 .

A continuación, se pueden ver dos interruptores encargados del acoplo AC/DC. Si el interruptor permanece abierto, la salida del amplificador se conecta en serie con un condensador y una resistencia, actuando como un filtro paso alto encargado de eliminar la componente continua (DC); por lo que a la salida solo tendremos la componente alterna (AC). Si el interruptor se cierra, el condensador se cortocircuita dejando pasar toda la señal, obteniendo el acoplo DC.

Después del primer filtro y después del segundo filtro, también se pueden ver dos amplificadores operacionales encargados de la selección de: Alta Velocidad / Bajo Ruido. Dependiendo de si se selecciona uno u otro, a la salida obtendremos una señal con una constante de tiempo menor o con un menor nivel de ruido.

En el caso del diseño, si no se implementa un LOCK-IN, no hace falta que el amplificador responda de manera exigente en cuanto a velocidad, ya que la velocidad de análisis no va a superar la velocidad del amplificador en bajo ruido.

Por último, se puede ver un detector de desbordamiento. Éste encenderá un led situado en la carcasa del amplificador, en el caso de que los amplificadores internos saturen su salida evitando, así, un resultado erróneo.

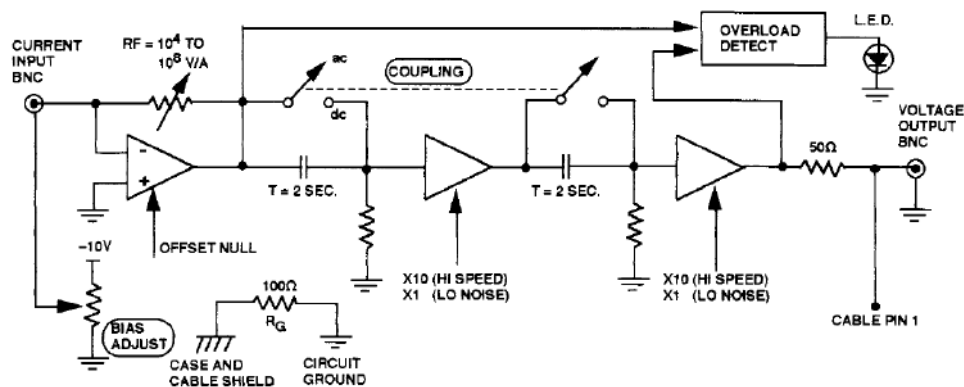


FIGURA A.42: Esquema detallado del funcionamiento interno del HMS

Es notable destacar que las características de este preamplificador para el uso con dispositivos láser, ofrecen una respuesta extremadamente alta para el fotodiodo del que se dispone. Esto significa que, como el fotodiodo que incorpora el monocromador *SI440* es relativamente grande y la potencia de un láser está focalizada, la corriente que generará el fotodiodo fácilmente desbordará el preamplificador en su etapa de menor amplificación.

Por esta misma razón, en el Apéndice B del TFG, se diseñará también una etapa amplificadora para cuando se trabaje con diodos láser capaces de saturar el preamplificador HMS.

Por otra parte, las prestaciones del HMS no se pueden conseguir fácilmente sobre el diseño de la PCB. Por esta misma razón, es interesante barajar la posibilidad de ofrecer un camino alternativo, a través del HMS. Ésto implica que se necesite una conexión adicional para dicho camino. Gracias a este otro camino de amplificación, se ofrecerá un sistema de análisis para cualquier tipo de fuente emisora de luz.

En el caso de que la fuente sea un diodo LED o incluso una lámpara incandescente, es necesario disponer de un elemento capaz de amplificar la corriente fotogenerada.

NOTA: Para el camino opcional a través del HMS, utilizar el conector SMA y mover la posición del *Jump*er correspondiente.

Las especificaciones del preamplificador son las siguientes:

- Sensibilidad:
 - 10^{-4} a 10^{-8} A V⁻¹ en el modo de “Bajo Ruido”
 - 10^{-6} a 10^{-10} A V⁻¹ en el modo de “Alta Velocidad”
- Polarización del fotodiodo ajustable de 0 V a 10 V
- Offset de entrada anulable a cero
- Acoplamientos AC/DC
- Corte de frecuencias bajas de 0.05 Hz -3dB en el acoplo AC @12dB/oct de atenuación
- Polaridad de salida invertida

- Impedancia de salida 50Ω
- Alimentación requerida (DC) desde ± 14 a $\pm 24V_{dc}$ @ 30 mA
- Temperatura y humedad
 - Operación de 0 a 45°C , 10 a 90 % R.H.
 - Almacenamiento -20 a $+60^\circ\text{C}$, 10 a 80 % R.H.
- Dimensiones $60 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 43 \text{ mm}$
- Peso 300 g

Las características del preamplificador para cada una de sus ganancias seleccionables se presentan en la Tabla A.10.

Características			
Rango de Bajo Ruido	Máximo pico de entrada	Frecuencia de 3dB	Ruido de entrada en circuito abierto @1kHz
10^{-8}	100 nA	3 kHz	1.3×10^{-14}
10^{-7}	1 μA	20 kHz	4.1×10^{-14}
10^{-6}	10 μA	150 kHz	1.3×10^{-13}
10^{-5}	100 μA	200 kHz	6×10^{-13}
10^{-4}	1 mA	250 kHz	4×10^{-12}
Rango de Alta Velocidad	Máximo pico de entrada	Frecuencia de 3dB	Ruido de entrada en circuito abierto @1kHz
10^{-10}	1 nA	3 kHz	1.3×10^{-14}
10^{-9}	10 nA	20 kHz	4.1×10^{-14}
10^{-8}	100 nA	150 kHz	1.3×10^{-13}
10^{-7}	1 μA	200 kHz	5×10^{-13}
10^{-6}	10 μA	250 kHz	3×10^{-12}

TABLA A.10: Características del preamplificador de corriente HMS

El efecto de un amplificador de corriente reside en la impedancia que realiza el cambio de corriente a voltaje. Debido a esto, hay que tener en cuenta tanto la importancia de la curva de impedancia de entrada como las curvas de dependencia con la frecuencia. Si nuestra amplificación no se realiza modulada para un lock-in, este parámetro no será tan importante, pero siempre hay que tener en cuenta que los componentes no se comportan de manera equilibrada a todas las frecuencias. A continuación se muestran las gráficas con estas dependencias, Figura A.43.

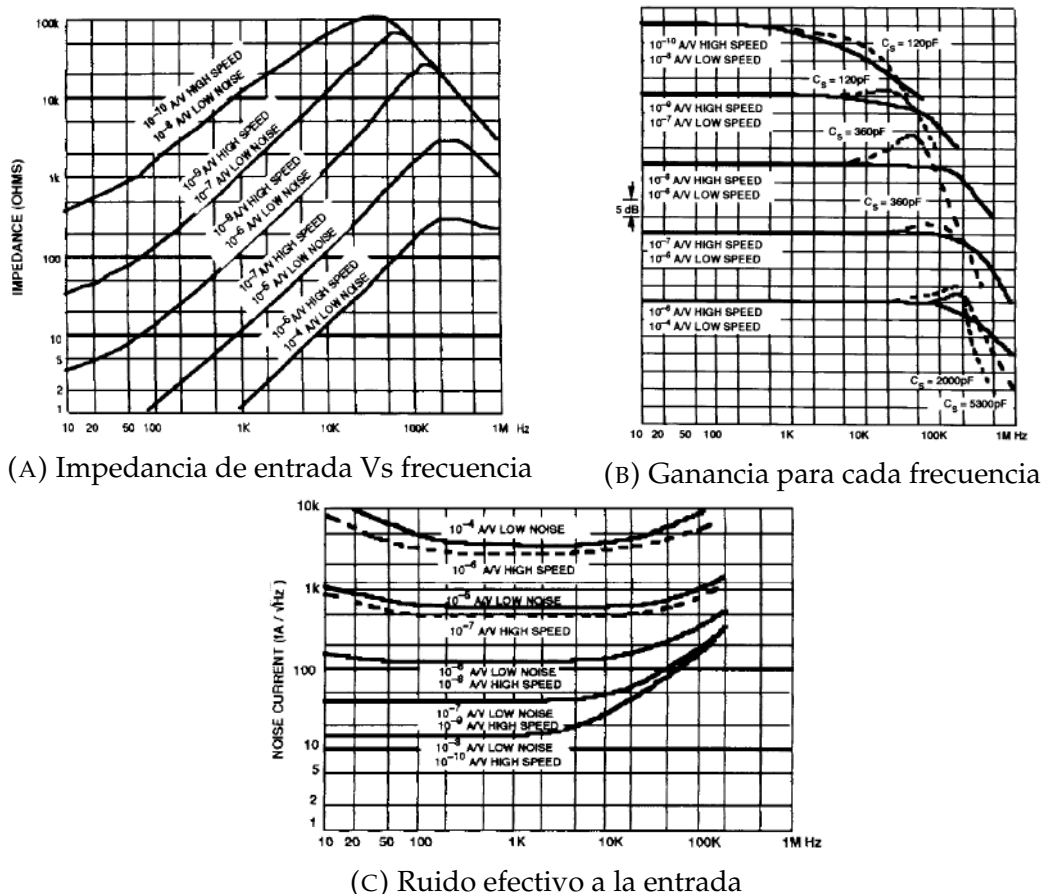


FIGURA A.43: Gráficas de respuesta en frecuencia del amplificador

En la Figura A.44 se puede ver la entrada del módulo preamplificador. En ella se observa que la entrada tiene siete terminales. En la entrada de alimentación, el módulo posee dos reguladores de tensión de $\pm 12V$; por lo que es indiferente la tensión de alimentación que se suministre, siempre y cuando ésta supere el mínimo de voltaje de funcionamiento de los reguladores.

Los colores correspondientes a los cables del preamplificador disponible en el laboratorio, son los siguientes:

1. Rojo \Leftrightarrow Señal de salida (Signal OUT)
2. Verde \Leftrightarrow Referencia para la señal (Signal GND)
3. Blanco \Leftrightarrow Referencia para alimentación (Power GND)
4. Marrón \Leftrightarrow -14 a -24V
5. Amarillo \Leftrightarrow +14 a +24V
6. Azul \Leftrightarrow Desbordamiento (Overload)
7. Negro \Leftrightarrow Tierra para la carcasa (Case GND)
8. Gris \Leftrightarrow Blindaje (Shield)

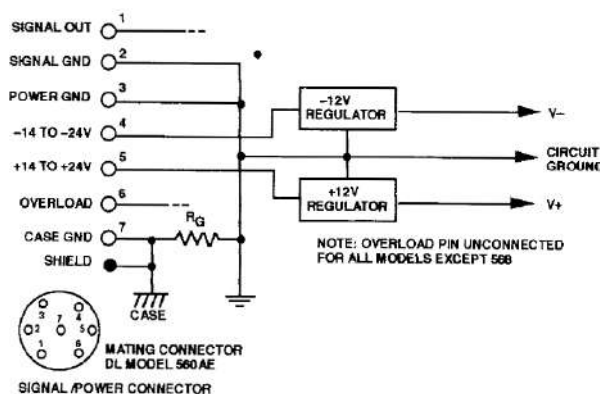


FIGURA A.44: Entrada del preamplificador HMS564

A.8. Fuente de alimentación Callex 32000 Series

El sistema analizador de fuentes emisoras de luz (cuyos componentes son los anteriormente citados en el capítulo A), tiene unos requisitos de alimentación no accesibles mediante cualquier fuente de alimentación disponible.

El circuito integrado *HTC* citado en el apartado A.4, establece los requisitos límite más importantes. Este integrado necesita una alimentación entre 5 V y 12 V y una corriente capaz de alimentar el módulo termoelectrico del *LDM* (apartado A.6). Por este motivo, se hace necesario una fuente de alimentación que sea capaz de proporcionar al menos 5 V y una corriente superior a la escogida en el *HTC* de 1 A.

Además del módulo *HTC*, hace falta alimentar también el módulo *LDD*. Éste necesita alimentaciones entre 5 V y 12.5 V y corrientes de 50 mA más la corriente consumida por el láser. La corriente consumida por el láser es de 100 mA como máximo, lo que aporta una corriente total máxima consumida por el *LDD* de 150 mA.

El resto de componentes del circuito tienen unos requisitos muy ligeros. Centrándonos en los requisitos de los componentes importantes y los componentes disponibles en el laboratorio, se decide la utilización de la fuente de alimentación *CALEX series 32000*. Ésta es capaz de ofrecer tensiones de entre 12 V y 15 V, y en el caso específico de la fuente del laboratorio (*CALEX 32012/28D*) se ajustará para que la salida proporcione 12 V, ofreciendo una corriente de hasta 6 A. Corriente más que suficiente para el diseño. Esta fuente se puede ver en la Figura A.45.



FIGURA A.45: Fuente de alimentación Calex 32000 series

A.8.1. Estructura interna de la fuente

La fuente de alimentación *CALEX 32012/28D* ofrece múltiples posibilidades de uso, tanto de entrada como de salida. Puede ser conectada a enchufes desde 100 V hasta 240 V, para ello hace falta saber cuáles son los terminales a conectar. En la Figura A.46 se puede ver el conexionado interno de bobinas.

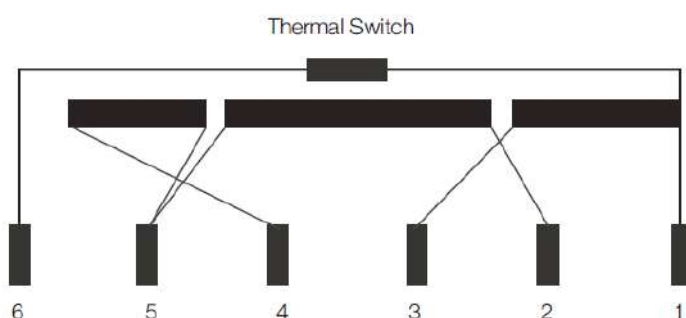


FIGURA A.46: Bobinado interno del transformador

En la Figura A.47 se puede ver la conexión que se realizará para la salida de la fuente de alimentación, teniendo en cuenta que ente los terminales OUT+ y OUT- tendremos el voltaje seleccionado.

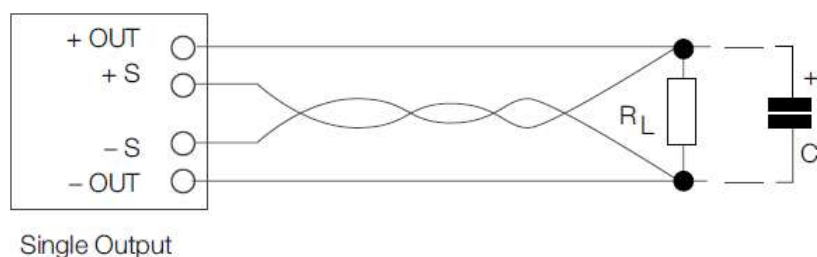


FIGURA A.47: Esquema de salida de la fuente de alimentación

Para realizar la conexión correcta, se seleccionará una salida de 12 V y una entrada de alterna de 220 V AC. Teniendo en cuenta la Tabla A.11 será necesario realizar un puente entre los terminales 2&3, y tomar la entrada de alterna en los pines 6&5. Como se puede apreciar en la Figura A.46, si se realiza esta conexión, el bobinado se recorrería casi entero; a excepción del primer bloque de la izquierda, que correspondería a realizar la conexión de los terminales 6&4 para 240 V AC

Para su uso a:	100V AC	120V AC	220V AC	240V AC
Puente:	1&2; 3&4	1&2; 3&4	2&3	2&3
Aplicar CA:	6&5	6&4	6&5	6&4

TABLA A.11: Configuración de los terminales

Una vez configurada la fuente de alimentación, se podrá alimentar tanto el *HTC* como el *LDD* y la placa. El único inconveniente se tiene a la hora de alimentar el módulo amplificador de corriente *HMS*, ya que precisa de una alimentación entre ± 14 V y ± 24 V.

Para solucionar este problema, se recurre a un transformador de 220 V a 15 V y un par de rectificadores. No se hace necesario incluir reguladores de tensión, ya que el propio módulo *HMS564* los incluye como se puede apreciar en la Figura A.44. La construcción de este módulo no pertenece a esta práctica, ya que se analizará con mayor detalle en el Apéndice B del TFG.

A.9. Amplificador LOCK-IN LIA100

Un amplificador *lock-in* es un instrumento que permite la medida de señales AC moduladas a una frecuencia determinada, donde la razón señal/ruido es baja. La función del amplificador es, por tanto, medir la componente de la señal a dicha frecuencia e ignorar el resto de frecuencias.

En concreto el *LIA100* consiste en un amplificador de entrada de AC programable, un detector sensible de fase monolítico (*PSD*), y un filtro paso bajo de salida programable de dos etapas. Estos bloques se pueden ver en la Figura A.48.

La entrada es un amplificador de ganancia programable para mejorar la señal de la entrada modulada.

El *PSD* se encarga de la traslación de la señal modulada a la banda base original de la

señal. Es por esto que se necesite una señal de referencia coherente con la señal modulada. Sin embargo, se puede extraer cualquier frecuencia, no solo la de banda base original (aunque no resulte de interés).

El filtro paso bajo de la salida ayuda a eliminar cualquier armónico generado por el PSD. Este filtro es ajustable a 10 ms, 100 ms, 1 s y 3 s. Además, ofrece la posibilidad de definir tiempos definidos por el usuario simplemente con añadir dos condensadores en en circuito impreso.

La principal ventaja del uso de un amplificador de lock-in, es que todo ruido no sincronizado que quede fuera de la fase de la señal, será suprimido por el *PSD*; por lo que obtendremos una relación señal a ruido mejorada en múltiples órdenes de magnitud.

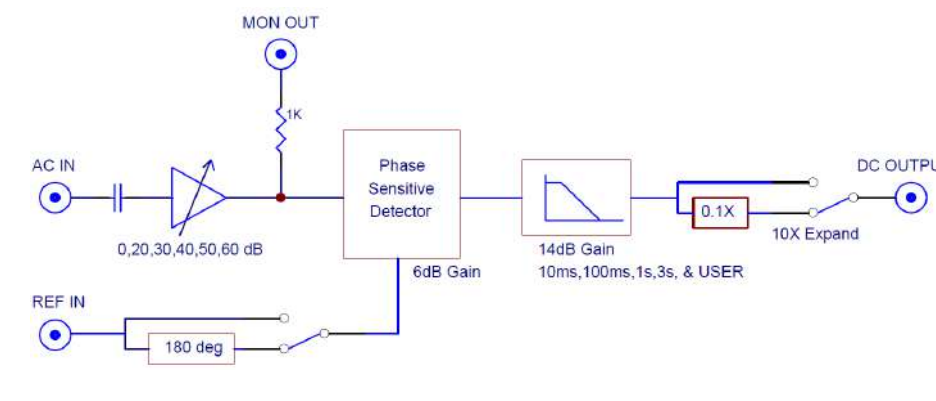


FIGURA A.48: Diagrama de bloques del Lock-In

Las especificaciones del amplificador lock-in son las siguientes:

- Entrada: Unipolar
- Impedancia de entrada: 1 M Ω en paralelo con 30 pF
- Sensibilidad (Ganancia AC): 0, 20, 30, 40, 50, 60dB
- Rango de entrada: 1 V, 100 mV, 30 mV, 10 mV, 3 mV, 1 mV
- Frecuencias: 1 Hz a 20 kHz
- Máximo voltaje de entrada: ± 10 V
- Ruido: 25 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz
- Entrada de referencia: ± 3 mV mínima y ± 12 mV máxima, 50 % duty cycle
- Referencia de fase: 0° ó 180°
- Impedancia de entrada de referencia: 100 k Ω
- Constante de tiempo del filtro de salida: 10 ms, 100 ms, 1 s, 3 s, definido por el usuario
- Salida: rango de ± 10 mV
- Impedancia de salida: 1 k Ω

- Expansión de la salida: 10X
- Ajuste del offset de salida: Potenciómetro de 12 giros
- Potencia de entrada: ± 12 mV DC con fuente de alimentación (incluida)
- Dimensiones: 2.5H x 5.5W x 6.5L
- Peso: 1.5 lbs

En un principio no se plantea introducir este componente en el presente trabajo, pero existe la posibilidad de realizar una ampliación de los componentes e incluir el lock-in para análisis de frecuencias moduladas del láser.

Apéndice B

Diseño eléctrico del sistema de caracterización

A lo largo de este capítulo correspondiente con la realización de prácticas extracurriculares, se presenta el estudio sobre el sistema eléctrico diseñado, que se ha realizado gracias a las herramientas de la suite Proteus desarrolladas por *Labcenter Electronics Ltd.* Proteus es un entorno integrado (*IDE*), diseñado para la realización completa de proyectos de construcción de equipos electrónicos. Engloba todas etapas de fabricación: diseño, simulación, depuración y construcción [4, 5].

El primer paso, consiste en el diseño del esquema eléctrico con *ISIS*. Durante la elaboración del mismo, se pueden realizar las simulaciones correspondientes con las herramientas ProSPICE (simulación del circuito electrónico) y *VSM* (simulación de la lógica del programa cargado en el microprocesador).

Una vez diseñado el esquema eléctrico en *ISIS*, se genera automáticamente la lista de redes o nodos (*NETLIST*). La herramienta *ARES* es capaz de recibir dicha lista de redes para diseñar, a partir de ella, la placa de circuito impreso *PCB*.

Una vez vista la finalidad de cada una de las herramientas utilizadas, el primer paso del proceso es realizar un estudio sobre los casos anteriores del trabajo. Ésto ayudará a la realización de un correcto conexionado de los componentes en el nuevo diseño.

B.1. Antecedentes del trabajo

Los proyectos estudiados de otros años proponen un sistema de caracterización óptica de diodos láser, que se compone de los siguientes elementos:

- Controlador de temperatura *HTC-1500*
- Controlador de diodos láser *LDD-100-1P*
- Módulo para soporte de diodos láser *LDM-4407*
- Tarjeta de adquisición de datos.



FIGURA B.1: Diseño antiguo del sistema de caracterización de diodos láser

El presente proyecto, pretende la actualización del sistema descrito en los anteriores PFC, Figura B.1. Una de las razones por las que se pretende actualizar, se debe a la tarjeta de adquisición de datos. Concretamente, la tarjeta utilizada (*ACL-8112HG* de *NuADQ*) se inserta directamente en el bus AT de un ordenador. Dicho Puerto ya no se encuentra disponible en ordenadores o portátiles actuales, que son los equipos finales que el usuario utilizará en la práctica.

Otro de los motivos de la modernización del sistema, y probablemente la razón más importante, es la ampliación del sistema. A parte del sistema antiguo, ahora se dispone de un monocromador de alta resolución espectral. Éste, se incluirá en el diseño para poder realizar análisis espectrales, ofreciendo una separación de espectros de 0.01nm (sensibilidad).

B.2. Descripción general

Para poder tener un sistema que ofrezca una completa caracterización de diodos láser, se necesita poder realizar las diversas caracterizaciones que corresponden a los diodos láser:

Caracterización eléctrica: Con este tipo de análisis se pueden obtener las siguientes características:

- La curva de potencia de salida frente a la corriente aplicada P-I
- El punto de operación del láser o la corriente umbral
- La eficiencia cuántica diferencial del diodo láser, como el incremento de potencia emitida por el diferencial de corriente inyectada.
- La potencia máxima de salida, donde la salida debe ser lineal o cuasi lineal. Cuando existen rizos o no linealidades, es porque se ha rebasado la potencia máxima de salida.

Caracterización óptica: Cuando se realice el análisis óptico del láser, será cuando más importancia tendrá el monocromador. Éste permitirá realizar un análisis muy sensible en cuanto a longitud de onda. Dentro de esta caracterización se pueden agrupar las siguientes características:

- Características espectrales como el modo longitudinal de emisión (monomodo o multimodo)
- Rango espectral de emisión
- Longitud de onda central
- Ancho de banda espectral
- Emisión de luz en el campo cercano y campo lejano

B.3. Componentes del nuevo sistema

Una vez vistos los parámetros que se necesita analizar, los componentes que determinan el estudio del nuevo sistema son los siguientes:

- Controlador de temperatura *HTC-1500*
- Controlador de diodos láser *LDD-100-1P*
- Módulo para soporte de diodos láser *LDM-4407*
- Monocromador *SP-300i*
- Amplificador de corriente *HMS564*
- Amplificador Lock-In *LIA100* (Opcional, ya que solo se utilizará como posible ampliación)

El control de los anteriores sistemas o módulos se realiza mediante un control microprogramado, gracias al microcontrolador *LPC2103* que se detalla en el punto **B.4**. La descripción de las comunicaciones que realiza el microcontrolador se pueden ver representadas en la Figura **B.2**. La figura representa los tipos de conexiones que lleva a cabo el microcontrolador para poder proporcionar un sistema completo de caracterización.

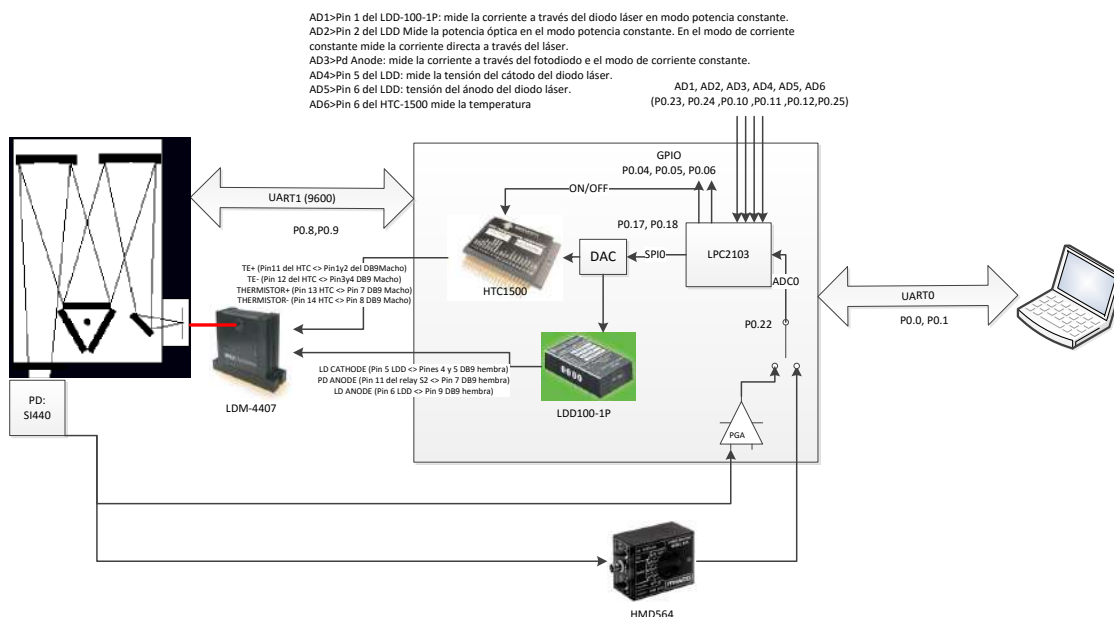


FIGURA B.2: Comunicaciones entre los componentes del sistema

Como se puede ver en la figura anterior, el control por parte del usuario final se realiza mediante un ordenador. Este ordenador debe disponer del software de control. Éste se comunicará con el microcontrolador por medio de un puerto USB del ordenador. Las especificaciones sobre los protocolos de comunicación se detallan en concreto en el punto **B.4**.

En la Figura B.2, también se puede observar esquemáticamente la conexión de cada componente entre el sistema. De ésta forma, se puede ver que las entradas y salidas del sistema se corresponden con las siguientes tablas B.1, B.2, B.3, B.3, B.4.

PCB	Entradas	Salidas	Función
	Mini USB Tipo B	Mini USB Tipo B	Comunicación serie con el LPC2103
	BNC		Entrada directa del fotodiodo del monocromador
	SMA		Entrada del amplificador de corriente HMS564
		DB9M	Comunicación serie (RS232) con el monocromador
		DB9M	Control de temperatura del LDM4407
		DB9F	Control del láser del LDM4407
		Bloque terminal	Conector para alimentación +12V
		Conn Sil	Salida de corriente (Fuente wilson) para LED's

TABLA B.1: Entradas y salidas de la PCB

Ordenador	Entradas	Salidas	Función
	USB Tipo A	USB Tipo A	Comunicación serie con el LPC2103

TABLA B.2: Entradas y salidas del ordenador

Monocromador	Entradas	Salidas	Función
	DB9F		Comunicación con la PCB
		BNC	Salida del fotodiodo

TABLA B.3: Entradas y salidas del monocromador

HMS564	Entradas	Salidas	Función
	BNC		Entrada desde el fotodiodo
		BNC	Salida en tensión del amplificador
	Conector de 7 pines	Conector de 7 pines	Conector para alimentación y señal de salida

TABLA B.4: Entradas y salidas del amplificador de corriente HMS564

B.4. LPC2103

El microprocesador escogido para la realización del proyecto es el *LPC2103* de *NXP*, empresa fundada por Philips. Es un microcontrolador *RISC* de 32-bit de alto rendimiento, de la familia *ARM7TDMI-S*. La documentación para el microcontrolador se puede encontrar tanto en la página del fabricante [15], como en páginas de proveedores de herramientas de desarrollo y software para dispositivos *ARM*, como *KEIL* [2]. En concreto, el manual de usuario en el que viene recogida toda la información es el *UM10161*, fácilmente accesible en Internet¹.

En la Figura B.3 se puede ver la composición de bloques del *LPC2103*. Los bloques más importantes, correspondientes con los periféricos empleados, se detallan a continuación junto con la utilidad que se le asigna a cada periférico.

¹http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10161.pdf

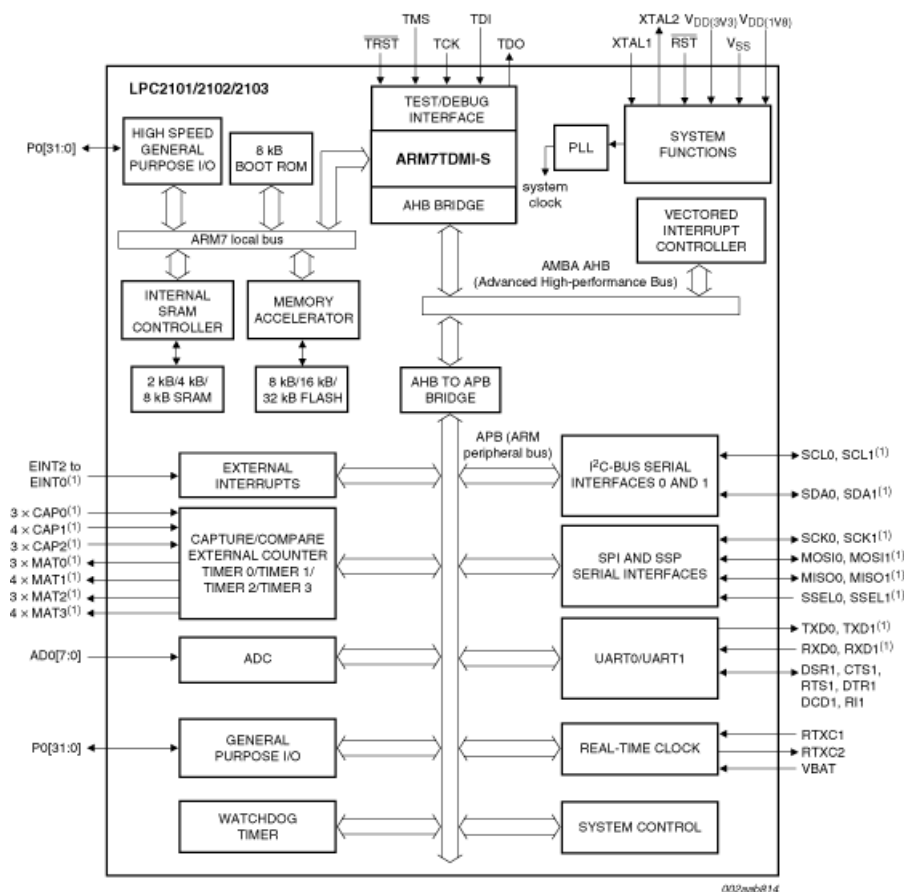


FIGURA B.3: Bloques funcionales del LPC2103

B.4.1. UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)

El LPC2103 posee dos UART. Ambas UART sirven de periféricos para la comunicación serie asíncrona del microcontrolador.

Las UART del LPC2103, y de la mayoría de microcontroladores de la serie LPC2xxx, corresponden con el estándar industrial 16550 de UART. Además, permiten la variación de los parámetros por medio de los bancos de registros asociados a la UART. La configuración de los registros de la UART se detalla en el punto 2.2 de esta memoria.

B.4.1.1. Introducción al protocolo serie asíncrono

Consiste en la transmisión serie de datos multibit en intervalos temporales indeterminados, donde cada dato tiene un número fijo de bits y un tiempo de bit constante. Tanto emisor como receptor disponen de un reloj para medir el tiempo de bit (conocido por ambos). Pueden no coincidir o estar desfasados, por eso es necesaria una resincronización periódica. El primer bit de cada dato será un bit de sincronización [10]. La composición de las tramas de cualquier comunicación serie asíncrona corresponden con lo siguiente:

- Bit de *start*: Las líneas de comunicación en estado ocioso (*idle state*) tiene un valor lógico "1" (*mark level*). El bit de *start* es un bit a "0" (*Space level*)

- Bit de datos: Se pueden transmitir 5, 6, 7 u 8 bits, comenzando por el bit menos significativo (LSBit) y terminando por el más significativo (MSBit)
- Bit de paridad: Utilizado para detectar errores. Hay dos criterios (paridad par o impar). Se calcula automáticamente por la UART.
 - La paridad que se transmite puede no ser calculada por la UART sino que se puede indicar de forma explícita → *Sticky parity*.
 - Un nuevo mecanismo de sincronismo de trama, es por ejemplo, si el primer byte tiene el bit de paridad a "1" y todos los demás de la trama a "0".
- Bit stop: Señaliza el final de la transferencia de cada dato.
 - Puede tener una duración de 1, 1.5 (con 5 bit de datos) o 2 (con 7 y 8 bit de datos) tiempos de bit.
 - Siempre vale "1"
 - Sirve para detectar errores. → *Error de framing*

Estos campos se pueden ver en la Figura B.4, correspondiente con la trama serie asíncrona.

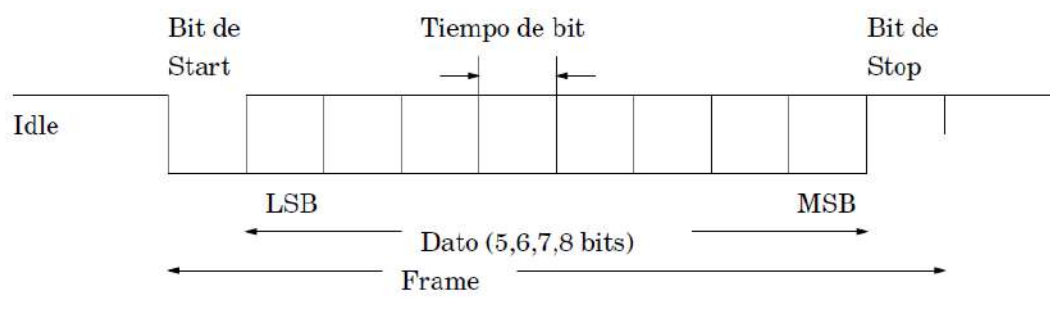


FIGURA B.4: Trama del protocolo serie asíncrono

Los detalles de configuración aplicados al microcontrolador de manera simplificada se muestran a continuación:

B.4.1.2. UART0

La UART0 es la encargada de la comunicación serie llevada a cabo entre el microcontrolador y el ordenador.

Para llevar a cabo dicha comunicación se necesita un interfaz capaz de realizar las conversiones pertinentes para que se comuniquen un microcontrolador y un puerto USB. Esta conversión se lleva a cabo mediante un convertidor de USB a serie, que en este caso lo desempeña el circuito integrado *FT232RL*.

La comunicación por medio de la UART0 tiene las siguientes características de configuración:

- Velocidad Serie: 115200 baudios

- Longitud de dato: 8 bits
- Sin bit de paridad
- 1 bit de Stop
- FIFO tanto en transmisión como recepción

B.4.1.3. UART1

La UART1 se encarga de la comunicación entre el microcontrolador y el monocromador. A diferencia de la UART0, tanto el microcontrolador como el monocromador se comunican a través del puerto serie asíncrono. Por lo tanto, el único requisito que se precisa a la salida del microcontrolador es adaptar la comunicación a niveles RS232. Para ello se necesita un convertidor de niveles TTL (salida del microcontrolador) a niveles compatibles con el estándar RS232. Estos niveles aparecen definidos en la Tabla B.5.

Nivel	TX	RX
"0" Space	+5V↔+15V	+3V↔+25V
"1" Mark	-5V↔-15V	-3V↔-25V
No definido	—	-3V↔3V

TABLA B.5: Niveles RS232

Las conexiones correspondientes a las dos *UART*, se pueden apreciar en la Figura B.5. En el diseño eléctrico de la figura se puede ver un array de protección frente a descargas electrostáticas, además de todas las conexiones existentes. Este integrado de protección frente a descargas electrostáticas, es opcional pero recomendable si se quieren pasar los requisitos de compatibilidad electromagnética.

En la figura también se puede apreciar tanto un LED rojo como uno verde, útiles para poder visualizar las comunicaciones realizadas por el *FT232RL*.

Un aspecto importante de esta parte del diseño, es que la alimentación de 5 V no es deseable que se realice mediante el USB. Este dispositivo, puede ofrecer tensiones de 5 V, pero en este caso ya se dispone de un regulador de ese mismo valor. Para evitar problemas en el circuito de alimentación, es recomendable que todo el circuito se alimente desde el mismo sitio (fuente de alimentación). De este modo evitamos problemas de diferencia de tensiones entre masas. La alimentación del USB en el diseño sirve únicamente para sacar al *FT232RL* de su estado de reset. Esta parte la realizan las resistencias R7 y R8 de la Figura B.5.

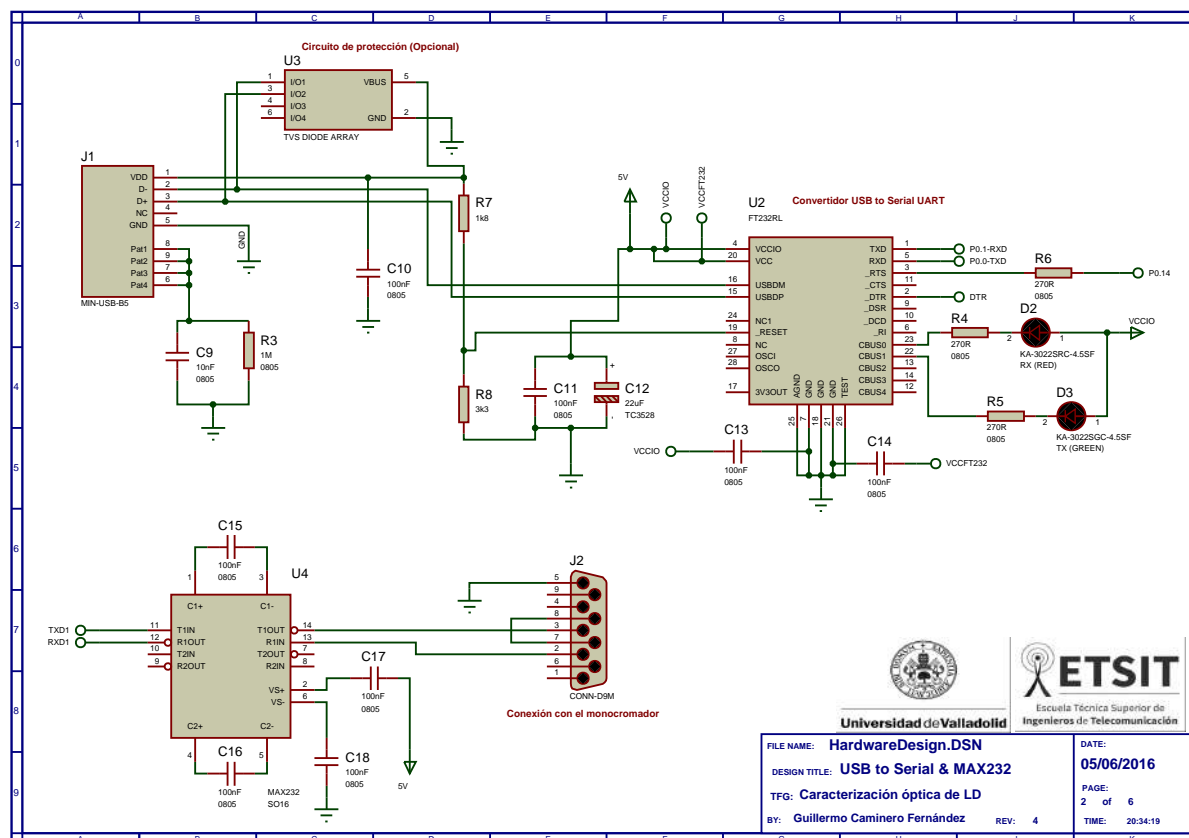


FIGURA B.5: Conexiones de las UART con el PC y el monocrómador

B.4.2. ADC o Convertidor Analógico Digital

El Convertidor Analógico a Digital proporciona un método para procesar señales analógicas y convertirlas de forma aproximada a una señal digital. Es inevitable la utilización de los convertidores en diseños de este tipo. Esto se debe a que en los sensores tiene lugar una conversión física a eléctrica por lo tanto analógica.

Debido a que trabajar con señales analógicas no es viable, la forma de tratar con estas señales analógicas es convertirlas a digital y realizar posteriormente un procesamiento digital. Una vez procesados los datos, siempre es posible volver al formato analógico utilizando un convertidor digital a analógico (DAC).

El microcontrolador *LPC2103* dispone de un convertidor (múltiple) analógico a digital. Las características principales del ADC integrado son las siguientes:

- Ocho canales de entrada multiplexados
- Conversión analógico a digital mediante aproximaciones sucesivas de 10 bit
- Modo apagado
- Medidas en el rango de 0 V a VDD (3.3 V) (típicamente 3 V para no exceder el nivel de voltaje de VDDA)
- Tiempo de conversión para 10 bits $\geq 2.44 \mu s$
- Modo de conversión en ráfaga tanto para entrada individual como múltiple

- Conversión opcional con pin de entrada o con el temporizador “*Match signal*”
- Registro dedicado para el resultado de cada entrada analógica con el objetivo de reducir la sobrecarga de interrupciones

La utilización de los canales para su posterior conversión, se realizará de la siguiente forma:

Canal 0: *AD0.0*. Encargado de convertir la señal procedente del fotodiodo del monocromador.

Canal 1: *AD0.1*. Conectado a la patilla 1 del *LDD100-1P (Current monitor)*. Encargado de medir la tensión en dicha patilla. Utilizado para medir la corriente que se está proporcionando al diodo láser.

Canal 2: *AD0.2*. Conectado a la patilla 2 del *LDD100-1P (Power monitor)*. Encargado de medir la tensión en dicha patilla, la cual proporciona una relación en medida de la potencia del láser.

Canal 3: *AD0.3*. Conectado a la patilla 3 del relé (*PD Anode*). Proporcionará las medidas correspondientes del fotodiodo integrado en el encapsulado del láser.

Canal 4: *AD0.4*. Conectado al cátodo del diodo láser.

Canal 5: *AD0.5*. Conectado al ánodo del diodo láser.

Canal 6: *AD0.6*. Conectado a la patilla 6 del integrado *HTC-1500 (ACT T Monitor)*. Encargado de la medida de la temperatura, gracias a la tensión proporcionada por dicha patilla.

Canal 7: *AD0.7*. No utilizado.

B.4.3. SPI Serial Peripheral Interface

Este protocolo de comunicaciones presenta las siguientes características:

- Originalmente empleado por Motorola
- No existe un estándar propio
- Se trata de un protocolo de bus multidrop, bidireccional y full-duplex
- Sigue la estrategia maestro-esclavo
- El maestro genera la señal de reloj (síncrono)
- Requiere de las siguientes señales:
 - SCK: Señal de reloj
 - MOSI: Master Output Slave Input
 - MISO: Master Input Slave Output
 - Slave Select (Entrada en el esclavo): Se necesita 1 línea por cada esclavo.

- GND

En el diseño de este trabajo, el protocolo *SPI* se utiliza para la comunicación serie con un convertidor digital a analógico *DAC*. En concreto se utiliza el *DAC* de *Microchip MCP4922-E/SL*, que se detalla más adelante en el apartado **B.8**.

A pesar de que el protocolo admite conexión bidireccional, la comunicación se realiza en un único sentido, correspondiente al sentido de salida del microcontrolador. Es decir, que el microcontrolador envía las órdenes de convertir al *DAC*, pero dicho integrado no contesta con información de retorno.

El microcontrolador *LPC2103* posee dos interfaces *SPI* (*SPI0* y *SPI1*). El interfaz escogido para dicha comunicación es el *SPI0*, por lo que la conexión encargada de dicha salida de datos, es la representada en el diseño con la señal *MOSI0*.

B.4.4. *GPIO* o *General Purpose Input Output*

En apartados anteriores se han reservados ciertos pines del microcontrolador para su uso como periféricos. El resto de pines sobrantes del microcontrolador, son configurados como pines para *GPIO* o pines para uso de propósito general.

La utilidad de estos pines queda limitada a poner su salida a “1” ó a “0”. Con dichos pines se controlan todas las señales que necesiten de un estado binario como, por ejemplo, encendido o apagado. De igual manera, si se juntan lógicamente varios pines de propósito general, se obtienen estados binarios de varios bits. Con esta agrupación lógica se controlan señales de varios niveles como, por ejemplo, los diferentes niveles de ganancia.

Las conexiones realizadas con el microcontrolador *LPC2103* se pueden ver en la Figura **B.6**. En dicha figura se pueden ver marcadas con etiquetas las siguientes conexiones:

- Salidas de control para el *CAD* (*SCK0*, *MOSI0*, *SSEL0*)
- Salidas de las *UART* (*TXD*, *RXD*, *TXD1*, *RXD1*)
- Pines de alimentación (*VBAT*, *UV3*, *UV3.2*, *VSSA*, *UVSS.1*, etc)
- Cristal de cuarzo para proporcionar señal de reloj fiable
- Pines de propósito general *GPIO* (*_LDAC*, *_LSHDN*, *LED-LAMP_ONOFF*, etc)
- Entradas para el convertidor analógico a digital (*PDANODE*, *LDCATHODE*, etc)
- Condensadores de desacoplo para evitar problemas y proporcionar una alimentación segura a interferencias
- Circuito para proporcionar un reset al microcontrolador compuesto de un botón y un circuito de descarga

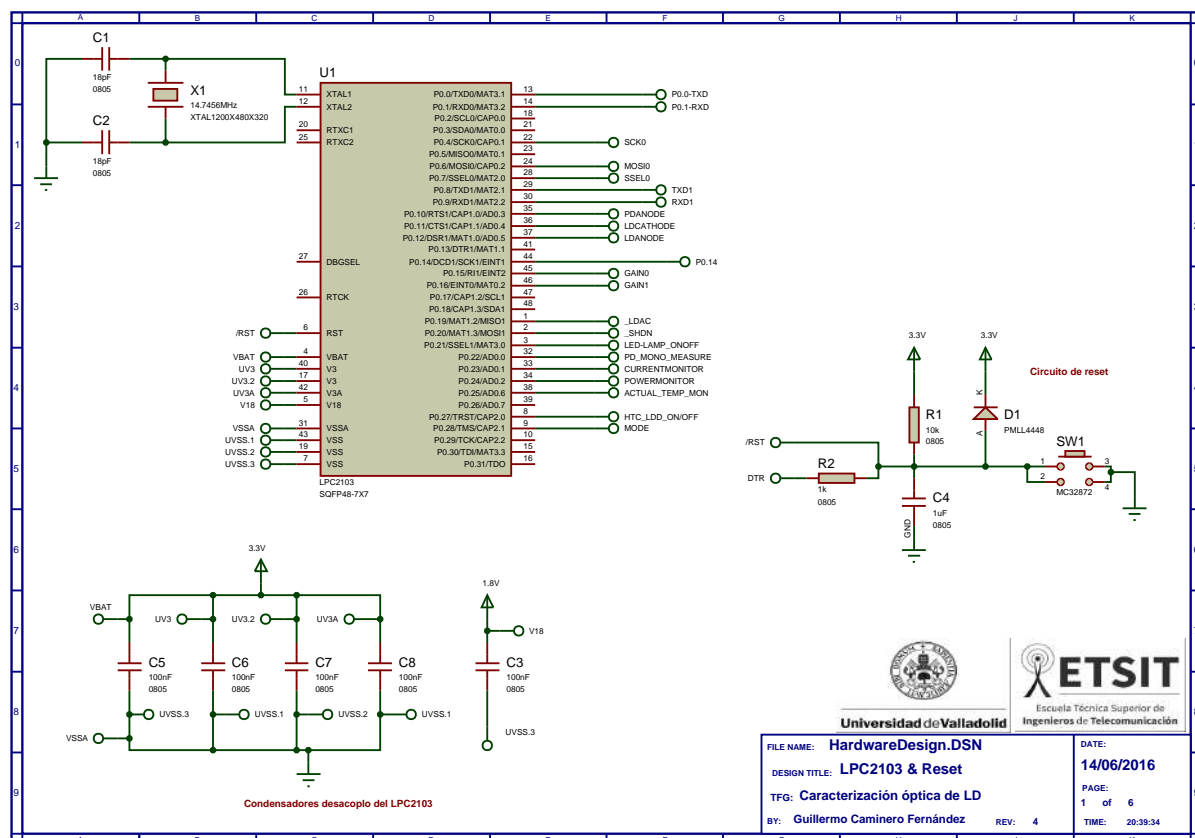


FIGURA B.6: Conexiones del microcontrolador LPC2103

B.5. Controlador de diodos láser LDD100-1P

En la figura B.7, se puede ver el conexionado realizado para el controlador de diodos láser LDD100-1P. El circuito integrado es estudiado en más detalle en el Apéndice A.5.

Como se puede ver en la misma figura **B.7**, la configuración de los dos modos en los que opera el *LDD100-1P* (potencia constante y corriente constante), se controlan por medio del relé de señal **IM06GR**. Éste, a su vez queda controlado por la señal *MODE* del *GPIO* del microcontrolador.

Se ha utilizado un relé y no un interruptor CMOS porque los interruptores CMOS ofrecen cierta resistencia serie, mientras que los relés no. A pesar de ser muy pequeña y despreciable (en ciertos casos) la resistencia de los interruptores CMOS, en el circuito del controlador de diodos esta resistencia es suficiente como para ocasionar pérdidas considerables.

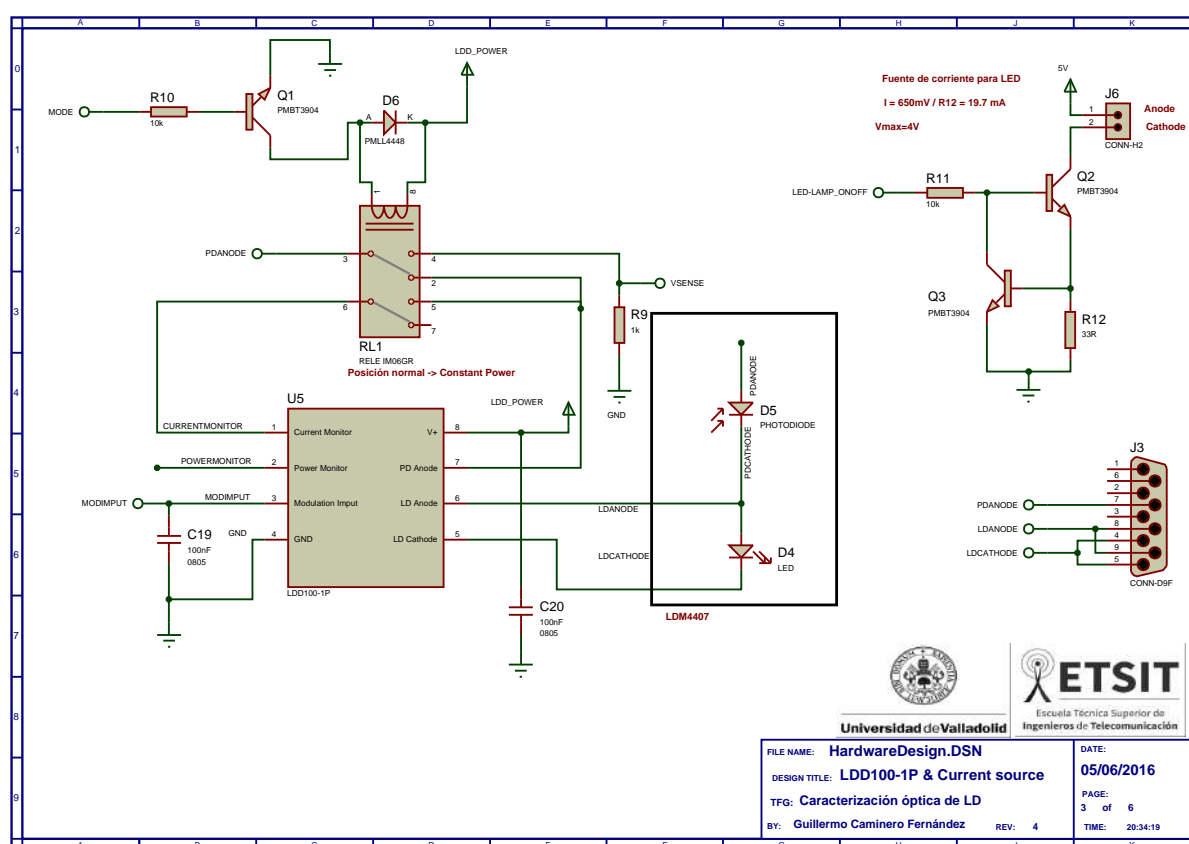


FIGURA B.7: Esquema eléctrico del LDD100-1P y diseño de la fuente de corriente Wilson

B.6. Fuente de corriente Wilson

En la Figura B.7 también se puede ver el diseño de la fuente de corriente Wilson. El diseño consta básicamente de dos transistores BJT y dos resistencias. Con este diseño se consigue suficiente corriente y tensión de disparo como para alimentar cualquier diodo LED. Utilizando la salida proporcionada por la fuente de corriente Wilson se puede

activar cualquier tipo de fuente externa junto con un pequeño acondicionamiento (relé externo). Por ejemplo, esto se podría utilizar para controlar una lámpara de mercurio u otro tipo de fuente luminosa.

Las ecuaciones correspondientes al funcionamiento de la fuente Wilson son las siguientes:

$$I_{op} = V_{BE}/R_{12} = 650\text{ mV}/33\text{ V} \approx 19,7\text{ mA} \quad (\text{B.1})$$

$$V_{opMAX} = 5\text{ V} - V_{CE} - V_{R12} = 5 - 0,2 - 0.0197\text{ mA} \times 33\text{ }\Omega \approx 4.15\text{ V} \quad (\text{B.2})$$

B.7. Controlador de temperatura HTC1500

En la Figura B.8 se puede ver el conexionado final realizado con el *HTC1500*. Las especificaciones técnicas, así como la decisión tomada para cada componente, se pueden estudiar en más detalle en el Apéndice A en el apartado A.4.

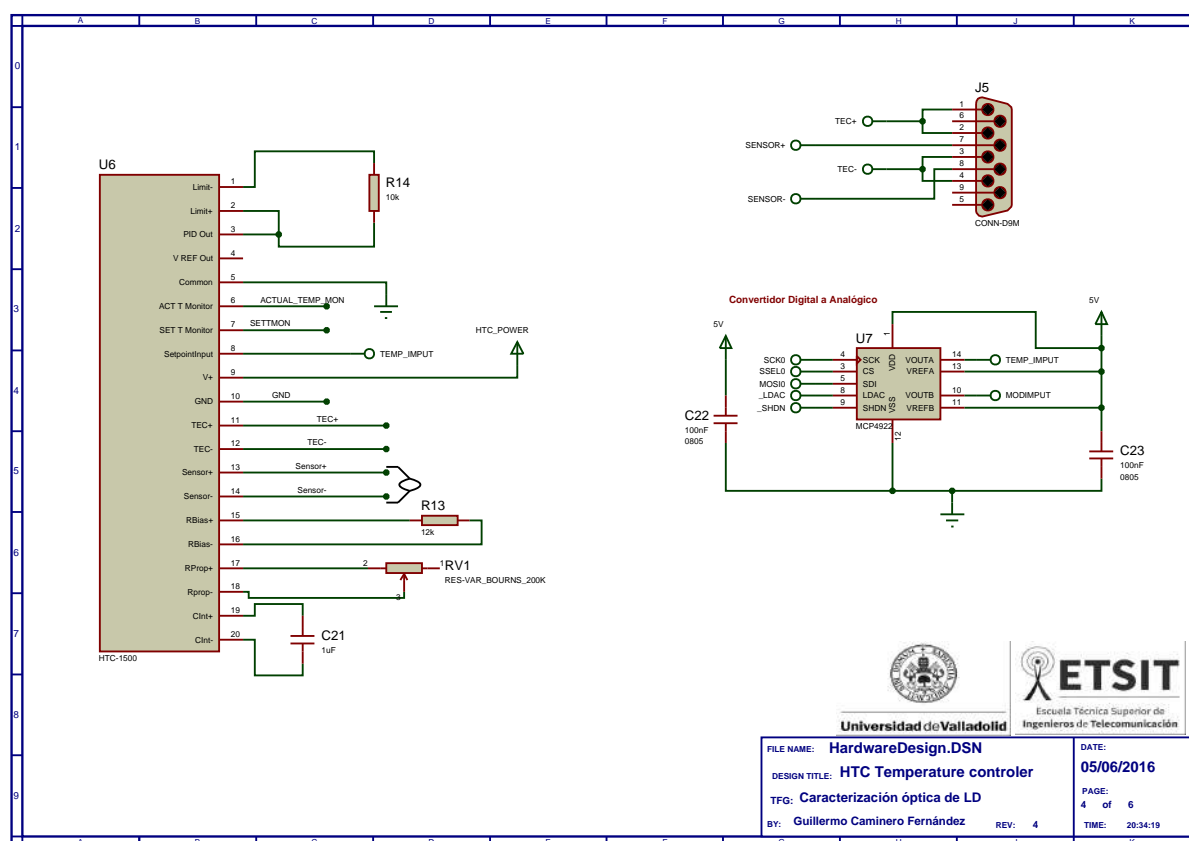


FIGURA B.8: Esquema eléctrico del HTC1500 y DAC

B.8. Convertidor Digital a Analógico o DAC

El circuito integrado *HTC-1500*, así como el *LDD100-1P*, realizan su control por medio de la tensión aplicada en uno de sus pines. Esta tensión es una señal analógica. Para conseguir señales analógicas se realiza mediante la utilización de convertidores de digital a analógico *DAC*.

En el diseño se da el caso en el hay que realizar control sobre dos señales analógicas en el mismo instante temporal, por lo que no existe la posibilidad de multiplexar la salida del *DAC*. La solución más adecuada es, por lo tanto, la utilización de un *DAC* con comunicación serie y salida dual.

El *DAC* escogido es el **MCP4922-E/SL** de **MICROCHIP**, un convertidor de salida doble controlado por medio de una interfaz *SPI*.

Entre las características principales de este circuito integrado destacan las siguientes:

- Resolución de 12-bit, lo que corresponde con una sensibilidad de aproximadamente $0.25 \mu V$
- Corriente de operación de $350 \mu A$ (típica)
- Pin de referencia de voltaje externa, lo que permite rangos de alimentación incluso por debajo del nivel de salida
- Rango de alimentación de $2.7 V$ a $5.5 V$
- Tiempo de establecimiento de la salida de $4.5 \mu s$
- Salida *Rail-to-rail*

La salida analógica del convertidor, respeta la siguiente ecuación B.3:

$$V_{OUT} = \frac{(V_{REF} \times D_n)}{2^n} \cdot G \quad (B.3)$$

Donde:

- V_{REF} = Voltaje de referencia externa
- D_n = Código de entrada al *DAC*
- G = Selector de ganancia
 - = 2 para $\overline{GA} > \text{bit} = 0$
 - = 1 para $\overline{GA} > \text{bit} = 1$
- n = Resolución del *DAC* = 12

En la Figura B.8 se pueden ver las conexiones correspondientes que se han realizado sobre el circuito integrado *MCP4922-E/SL*. La conexión realizada a la patilla de referencia externa es de $5 V$. Este aspecto es importante ya que predefine el rango de salida del convertidor. Las tensiones que se necesitan a la salida, entran dentro de este mismo rango, por lo que la ganancia que se seleccionará en todo caso será de $G = 1$. Así se consiguen salidas comprendidas entre $0 V$ y $5 V$

Las correspondencias señal-función escogidas para controlar el resto de pines del circuito integrado, son las que se ven en la siguiente Tabla B.6.

Descripción de los pines del MCP4922		
PIN	Señal	Función
V_{DD}	5 V	Pin de alimentación
NC	NC	Sin conexión
\overline{CS}	SSEL0	SPI - Selección de chip
SCK	SCK0	SPI - Reloj
SDI	MOSI	SPI - Datos hacia el esclavo
NC	NC	Sin conexión
NC	NC	Sin conexión
\overline{LDAC}	$_LDAC$	Entrada de sincronización, transfiere los datos de los registros de entrada a los de salida
\overline{SHDN}	$_SHDN$	Entrada de apagado hardware
V_{OUTB}	MODIMPUT	Salida B para el control del LDD
V_{REFB}	5 V	Tensión de referencia para la salida B
V_{SS}	0 V	Pin de referencia a tierra
V_{REFA}	5 V	Tensión de referencia para la salida A
V_{OUTA}	TEMP_IMPUT	Salida A para el control del HTC

TABLA B.6: Descripción de los pines del DAC

Una vez vistos los pines del integrado y su funcionalidad, es interesante remarcar que su funcionamiento se basa en el protocolo serie *SPI*. Gracias a este protocolo de comunicaciones, se posibilita el envío de un código de 12 bits mediante una única línea de datos, ahorrando así requisitos del microcontrolador. La configuración con este circuito integrado se estudia con más detalle en el apartado 2.3 de esta memoria.

B.9. Alimentación

En la Figura B.9 se observa el diseño eléctrico de la parte correspondiente a la alimentación del circuito. Las tensiones necesarias y su finalidad se pueden ver en la siguiente Tabla B.7:

Alimentación	
Tensión	Aplicación
12 V	Alimentación principal del circuito LDD (Si Q4 ON) Relé
8 V	HTC (Si Q4 ON) FT232RL MAX232
5 V	Fuente de corriente para LED MCP4922 (DAC) 74HC4052 (MUX) MCP6282 (OPAMP)
3.3 V	LPC2103
1.8 V	LPC2103

TABLA B.7: Tensión de alimentación principal de los circuitos integrados

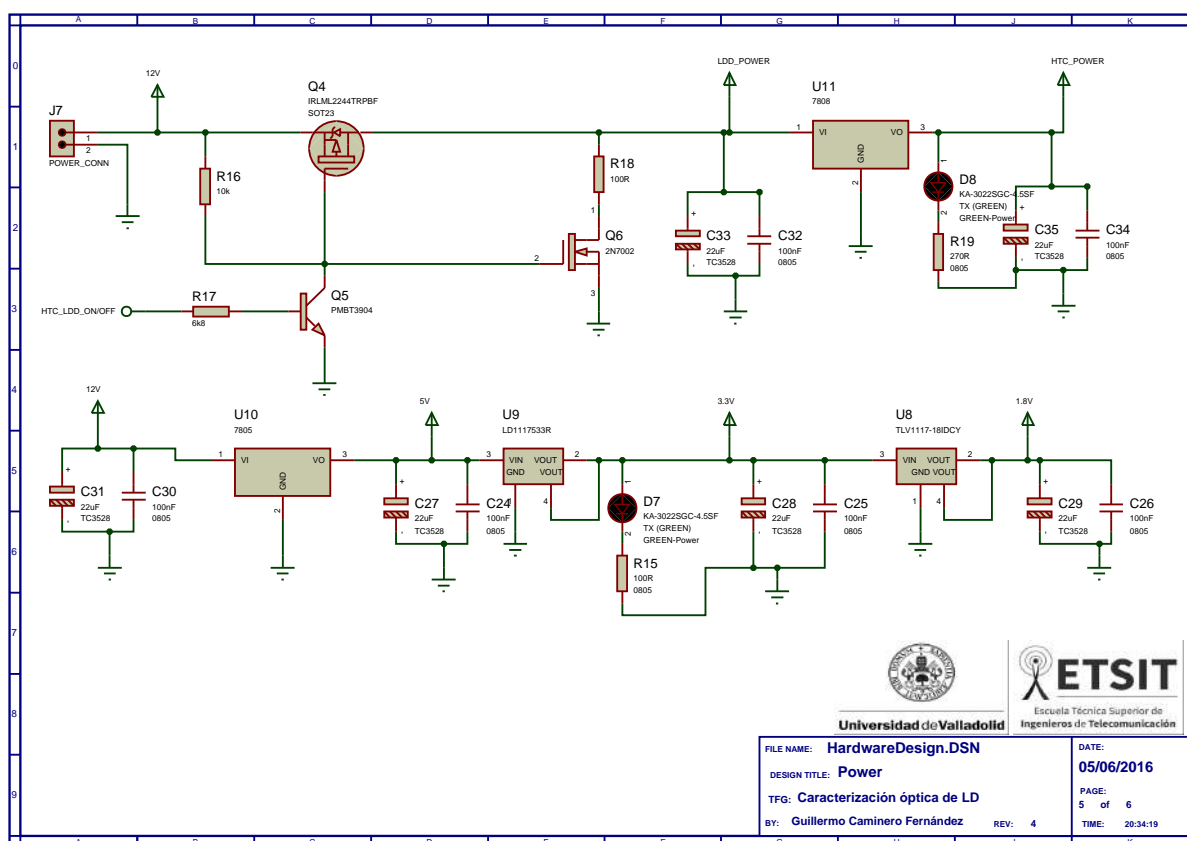


FIGURA B.9: Alimentación del sistema de caracterización óptica

Para poder obtener todas las tensiones de alimentación, se utilizan cuatro reguladores de tensión (8 V, 5 V, 3.3 V, 8 V). No se utiliza un regulador de 12 V ya que la alimentación proporciona una señal estable ya regulada de 12 V.

Una vez se han vistas las tensiones necesarias, el siguiente paso es hacer un estudio sobre el consumo de corriente a cada tensión, que proporciona un estudio aproximado de la potencia total que consume el dispositivo. La corriente que consume cada circuito integrado, se puede encontrar en las hojas de especificaciones propias de cada uno. Entre las corrientes propuestas, se escoge la máxima ya que el valor de potencia más interesante a calcular, es la potencia máxima que consume el circuito. Conocida la potencia que consume el circuito, se puede seleccionar una fuente de alimentación apta para el mismo.

El estudio de la corriente de cada componente se puede ver en la siguiente Tabla B.8.

Consumo de corriente			
Dispositivo	Nombre	Corriente(mA)	Tensión(V)
U1	LPC2103	70	1.8
U2	FT232RL	15	5
U3	ESD/TVS	-	-
U4	MAX232	10	5
U5	LDD100-1P	150	12
U6	HTC-1500	1100.1	8
U7	MCP4922	0.7	5
U8	TLV1117533R	5	5
U9	LD1117533R	5	5
U10	L7805CV	6.8	12
U11	L7808CV	6.8	12
U12	74HC4052	0.001	5
U13A	MCP6282	25.45	5
U13B	MCP6282	25.45	5
D2	LED-R	11.66	5
D3	LED-G	10.37	5
D7	LED-G	11	3.3
D8	LED-G	10.7	8
	Fuente de corriente	19.7	5

TABLA B.8: Estudio teórico del consumo de corriente de cada circuito integrado

Como se puede ver en la Tabla B.8, el circuito integrado que consume mayor parte de la potencia total del circuito (1.1 A) es el *HTC-1500*.

El siguiente paso a la hora de obtener los requisitos necesarios para el diseño de la alimentación, es estudiar el desglose de la potencia que consume cada regulador así como la fuente final. Este estudio queda detallado en la Tabla B.9 y gracias a él, se puede determinar que la potencia mínima que tiene que suministrar la fuente de alimentación es de unos 18 W. Es decir, esto significa que a una tensión de 12 V, dicha fuente tiene que proporcionar una corriente de 1.5 A.

La fuente disponible en el laboratorio y estudiada en el Capítulo A.8 proporciona una tensión de 12 V y una corriente de 6 A, más que suficiente para los requisitos.

Debido al gran tamaño de esta fuente de alimentación y a su excesiva potencia, la alimentación del circuito se plantea desde otra fuente regulada, como por ejemplo, un transformador de pared. El transformador disponible en el departamento, y ya utilizado en otros proyectos, es el *DA18-120EU-M*. Éste tiene exactamente las características anteriormente mencionadas (1.5 A@12 V), por lo que debería ser suficiente.

Consumo de potencia por regulador					
	mA@12 V	mA@8 V	mA@5 V	mA@3.3 V	mA@1.8 V
	70		70	70	70
	5		5	5	
	11		11	11	
	15		15		
	10		10		
	0.7		0.7		
	5		5		
	25.45		25.45		
	25.45		25.45		
	11.66		11.66		
	10.37		10.37		
	19.7		19.7		
	1100.1	1100.1			
	6.8	6.8			
	10.7	10.7			
	150				
	6.8				
Corriente en mA(@V)	1483.731	1117.6	209.331	86	70
POTENCIA TOTAL en W(@V)	17.80477	8.9408	1.046655	0.2838	0.126

TABLA B.9: Consumo de corriente y cálculo de potencia para cada tensión

B.9.1. Análisis térmico

El análisis térmico del circuito eléctrico, es un aspecto importante que también hay que tener en cuenta. Si los reguladores tienen altas caídas de tensión, implica que tendrán altas temperaturas. Hay que respetar los rangos de temperatura de trabajo que proporciona el fabricante, por lo que siempre es conveniente realizar un análisis térmico previo a la fabricación. Ésto dará una aproximación teórica de las temperaturas que alcanzará el diseño.

El análisis térmico depende de los coeficientes térmicos del regulador, así como de la potencia consumida por los mismos. Razón por la que se realiza después del análisis del consumo eléctrico.

El análisis térmico queda especificado en la Tabla B.10.

Dispositivo	Regulador	R_{thJA} ($^{\circ}\text{C W}^{-1}$)	Potencia disipada	Temperatura
U8	1.8 V	104.3	0.105 W	35.9515 $^{\circ}\text{C}$
U9	3.3 V	110	0.1462 W	41.082 $^{\circ}\text{C}$
U10	5 V	50	0.627 993 W	56.399 65 $^{\circ}\text{C}$
U11	8 V	50	4.4704 W	248.52 $^{\circ}\text{C}$

TABLA B.10: Análisis térmico del circuito

Las ecuaciones que se han utilizado para obtener los resultados de la tabla, son las de potencia disipada en el regulador (Ecuación B.4) y la de temperatura máxima alcanzada (Ecuación B.5).

$$P = (V_{IN} - V_{OUT}) * I_{SUP} \quad (\text{B.4})$$

$$T = T_{amb} + R_{thJA} * P_{dis} \quad (\text{B.5})$$

En la Tabla B.10, se puede ver cómo la temperatura del regulador de 8 V se dispara. Esto se debe a dos razones:

- Los cálculos se han tomado para que el resultado sea el máximo esperado
- No se ha tenido en cuenta el disipador térmico que se coloca en el regulador

Atendiendo a estas razones, se puede asegurar que la temperatura máxima que se alcanza será muy inferior a la descrita. No obstante, los reguladores de 5 V y 8 V tienen un encapsulado TO-220. Este encapsulado disipa bien el calor, pero a pesar de ello, se les proporciona un disipador térmico. Con él, se reduce de manera significativa la temperatura que éstos alcanzan.

Los cálculos realizados anteriormente, representan únicamente la temperatura de forma teórica. En el proceso de fabricación y test, se utilizará una cámara térmica para asegurar de que ningún componente exceda la temperatura permitida.

B.10. Acondicionamiento de la señal del fotodiodo

En la Figura B.10 se puede ver el circuito realizado para tratar la señal de entrada a la PCB, desde el fotodiodo del monocromador.

El circuito pretende adaptar la señal de dos formas distintas. Una primera forma, que utiliza el amplificador externo HMS564, visto en el Capítulo A.7. Una segunda forma, mediante un amplificador de ganancia programable interno.

La salida del fotodiodo se proporciona directamente mediante un cable coaxial, por lo que la entrada de estos dos circuitos debe respetar dicho cable. Por esto mismo, la entrada directa al amplificador programable, se realiza mediante el cable coaxial por el conector BNC. Por otro lado, la entrada por el amplificador HMS564 se realiza mediante un conector SMA, directamente acoplado al conector BNC mediante un conector híbrido. Este cambio de conector, evita los posibles problemas de la conexión inversa y posibles daños del circuito. De todos modos, a la entrada del convertidor ADC del

microcontrolador, se coloca un par de diodos *schottky* y una resistencia como circuito de protección frente a sobretensiones. De esta forma, la tensión máxima permitida a la entrada del convertidor será de $3.3\text{ V} + V_F \approx 3,68$.

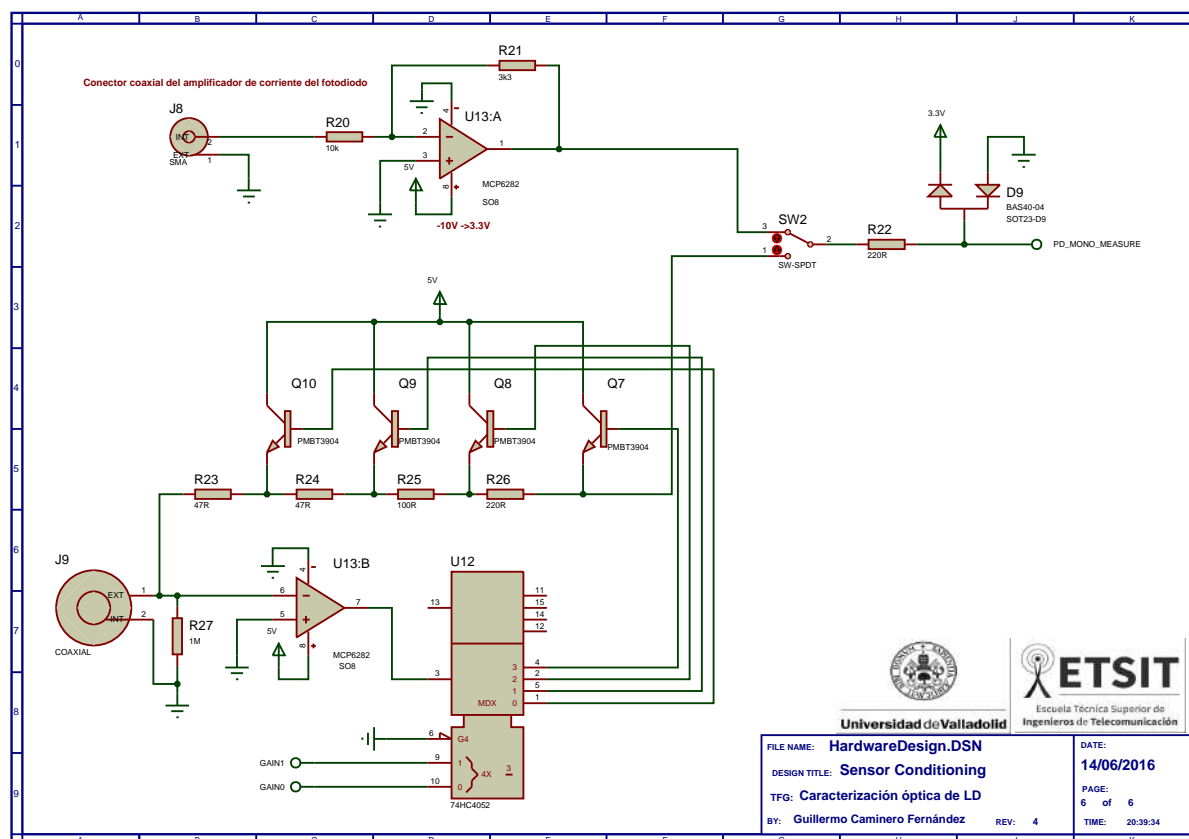


FIGURA B.10: Acondicionamiento de la señal de entrada

B.10.0.1. Amplificación externa. HMS564

La adquisición de la señal mediante el amplificador de corriente *HMS564*, es una de las dos formas que implementa el circuito de adquisición de la señal.

Para poder funcionar en este modo, el switch de la Figura B.10, debe estar en la posición adecuada. Esto permite que la salida de dicho amplificador de corriente, se conecte mediante un amplificador inversor a la entrada del convertidor analógico a digital del microcontrolador.

Gracias a este amplificador obtenemos unas ganancias de conversión de corriente desde $10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}}$ a $10^{-10} \frac{\text{A}}{\text{V}}$. Lo que quiere decir, que este amplificador convierte la entrada en corriente en una salida en tensión, con unas ganancias de entre 10^4 y 10^{10} .

La salida de este amplificador, independientemente de la ganancia, estará en un rango de 0 V a -10 V ². Por otro lado, la solución propuesta se encuentra en el Capítulo 6 en el apartado 6.2.6. Por este motivo, la etapa de acondicionamiento de la señal de entrada ha de convertir dichos niveles de tensión a unos apropiados para la entrada del ADC (0 V a 3.3 V). Esto se consigue fácilmente con un amplificador operacional en

²Durante la fabricación se detectó un error en la posición del fotodiodo. La salida correcta del HMS, finalmente corresponde con el rango 0 V a 10 V . La explicación de este suceso se puede encontrar en el Capítulo 4, apartado 4.1

configuración inversora. Las ecuaciones que respeta el amplificador **MCP6282** (U13:A de la Figura B.10) son las siguientes:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{R_{21}}{R_{20}} \Rightarrow \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_{21}}{R_{20}} \quad (\text{B.6})$$

Para elegir el valor de las resistencias de forma correcta, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{R_{21}}{R_{20}} = \frac{-V_{OUT}}{V_{IN}} = 0,33 \Rightarrow R_{21} = 0,33R_{20} \quad (\text{B.7})$$

B.10.0.2. Amplificación interna. PGA

La segunda forma de adquisición de la señal del fotodiodo, es la realización de un amplificador interno para la señal del fotodiodo (corriente). En este caso, el circuito interno es el encargado de convertir de corriente a tensión la señal procedente del fotodiodo para el convertidor *ADC* del microcontrolador.

El diseño escogido para la amplificación de la fotocorriente generada, se puede ver en la Figura B.10. Este diseño se compone de un amplificador operacional **MCP6282**(U13:B de la Figura B.10), un multiplexor digital CMOS **74HC4052** y una red de resistencias, que convierten la corriente en tensión. A parte de estos elementos principales, el diseño también incluye transistores bipolares para ayudar al operacional a conseguir las tensiones de salida necesarias. Éstos son imprescindibles debido a que las ganancias necesarias no se pueden conseguir directamente con la baja corriente de salida que proporciona el amplificador operacional.

La ganancia de este amplificador se determina mediante las correspondientes entradas de selección del multiplexor, denotadas en el diseño como “GAIN0” y “GAIN1”. De esta forma, la ganancia obtenida corresponde con la siguiente Tabla B.11.

Selección		Ganancia
GAIN1	GAIN0	
0	0	47
0	1	94
1	0	194
1	1	414

TABLA B.11: Correspondencia de las señales GAIN0 y GAIN1

Las ganancias de este amplificador, se han seleccionado de tal forma que sean útiles en el rango de potencias del láser que se pretende analizar. A continuación, se propone un ejemplo en el cual se explica la ganancia apropiada para un láser:

Si se tiene un láser de 10 mW, las salidas del fotodiodo para la máxima y la mínima responsividad serán las siguientes:

$$10 \text{ mW} \times \sim 5,5 \text{ A W}^{-1} = 55 \text{ mA}$$

$$10 \text{ mW} \times \sim 1,3 \text{ A W}^{-1} = 13 \text{ mA}$$

Teniendo en cuenta esto, la corriente fotogenerada está comprendida entre 13 mA y 55 mA. A su vez, el rango de entrada del ADC del microcontrolador sigue siendo de 3.3 V, por lo que una ganancia favorable para este láser es la que mejor se ajuste para el máximo de la corriente: 55 mA \rightarrow 3.3 V. En definitiva, la ganancia más apropiada es $G = \frac{3.3 \text{ V}}{55 \text{ mA}} = 60$

Atendiendo a las ganancias del amplificador programable, la ganancia que se tiene que escoger para este láser es de $\times 47$. Con este valor, la ganancia es máxima sin llegar a saturar como ocurriría con el siguiente valor de ganancia $\times 94$

Es importante remarcar que para que el convertidor ADC del microcontrolador pueda obtener esta señal, el switch debe estar en la posición correspondiente a a salida del PGA.

B.11. Diseño de la PCB

Una vez vistos todos los componentes del sistema y su esquema eléctrico, se procede a la realización del diseño de la placa de circuito impreso.

El diseño de la PCB se realiza mediante la herramienta *ARES (Advanced Routing and Editing Software* o Software de Edición y Ruteo Avanzado). Se trata de una herramienta de la suite *Proteus* dedicada al diseño de placas de circuito impreso. Una vez se ha diseñado en *ISIS* el esquema eléctrico, se genera automáticamente la lista de redes (*NETLIST*). Una red es un grupo de pines interconectados entre sí y la lista de redes es una lista con todas las redes que forman parte del diseño. *ARES* es capaz de recibir esta lista de redes para diseñar, a partir de ella, la placa de circuito impreso. De esta forma, se asegura que la placa tiene unidos entre sí los pines de forma idéntica a como se han definido en el esquema eléctrico.

B.11.1. Especificaciones del fabricante

Antes de empezar con el diseño de la placa de circuito impreso, hay que estudiar las especificaciones que proporciona el fabricante. Dichas especificaciones son necesarias para verificar que el diseño cumple las normas de fabricación.

La fabricación de la *PCB* se realiza gracias a la empresa *Itead*, situada en Shenzhen (China), con la que se pueden realizar prototipados de manera fácil y rápida. Las características de dichos prototipos se pueden encontrar en la pagina web del fabricante, así como en el Apéndice C en los puntos C.4, C.5, C.6, C.7 [17, 18].

B.11.2. PCB escogida

La placa de circuito impreso escogida en la empresa anteriormente comentada, ofrece las siguientes características:

- Tamaño de PCB: 10 cm × 10 cm
- Espesor de la PCB: 1.6 mm
- Acabado de la superficie: HASL (*Hot Air Solder Leveling*)
- Test eléctrico gratuito (*E-test*)
- Espesor del cobre: 1 oz ($\approx 35 \mu\text{m}$ de alto)

B.11.3. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación se realiza de acuerdo con la siguiente ordenación:

1. Una vez se comienza a hacer el diseño en *ARES*, se fijan los parámetros respectivos a las características del fabricante (*Design Rule Manager*)
2. Se fija el borde de la placa (*Board Edge*) con el tamaño de PCB escogido 10 cm × 10 cm
3. Tras fijar el borde, se colocan todos los componentes procedentes del diseño del *ISIS*, intentando seguir un orden lógico, como por ejemplo: que la alimentación se sitúe en cascada o que los circuitos integrados con funcionalidades conjuntas estén cerca, ya que las conexiones serán más cortas
4. Después de colocar todos los componentes hay que realizar todas las conexiones. Utilizando el *NETLIST* que proporciona *ISIS*, se asegura que estas conexiones se realicen de manera correcta. Se intenta minimizar en la medida de lo posible tanto las emisiones como las debilidades electromagnéticas, por lo que hay que tener en cuenta lo siguiente:
 - Intentar que las líneas sean lo más cortas posibles, sobre todo si éstas son atravesadas por señales de alta frecuencia. Evitar bucles de corriente que provocan antenas indeseadas
 - Evitar las esquinas (codos de 90°) cuando se realiza el rutado
 - Intentar que todas las líneas queden en 0°, 45° ó 90° respecto a los bordes de la PCB
 - Tener al menos un plano de masa general (resulta conveniente)
 - Intentar separar las partes analógica y digital
 - Proveer de un camino de regreso próximo a todas las señales y que todas las alimentaciones tengan su tierra con camino directo (un camino apropiado es el plano de masa)
 - Evitar que se corte el plano de masa en la medida de lo posible
 - Desacoplar todos los circuitos integrados sensibles, como los reguladores o los encargados de las comunicaciones

- Blindar en la medida de lo posible, tanto el diseño como los cables de entrada/salida, para intentar evitar radiación entrante y evitar radiar al exterior
5. Cuando ya se tienen todos los componentes fijados y todas las líneas rutadas, el siguiente paso es generar los ficheros gerber. Éstos se envían a la empresa elegida para que procedan a su fabricación

El diseño de la PCB final se puede ver en la Figura B.11. Se han eliminado los planos de tierra para que las conexiones resulten más visuales, por lo tanto se debe suponer que hay tanto plano de tierra superior como inferior.

El diseño de la PCB con sus planos de tierra, visualizado sobre el IDE de ARES, se puede ver en la Figura B.12.

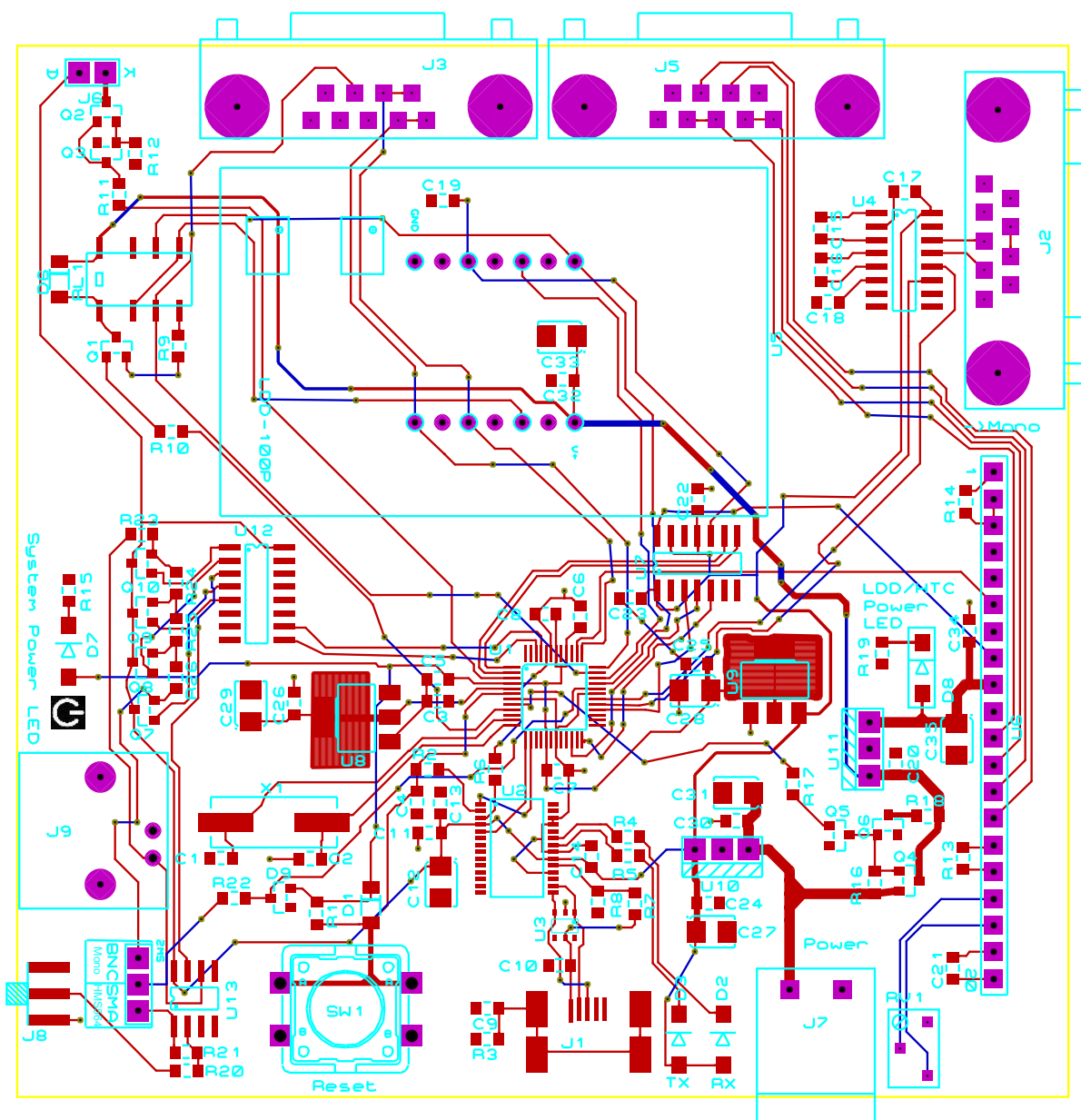


FIGURA B.11: Resultado del diseño de la PCB sin planos de tierra

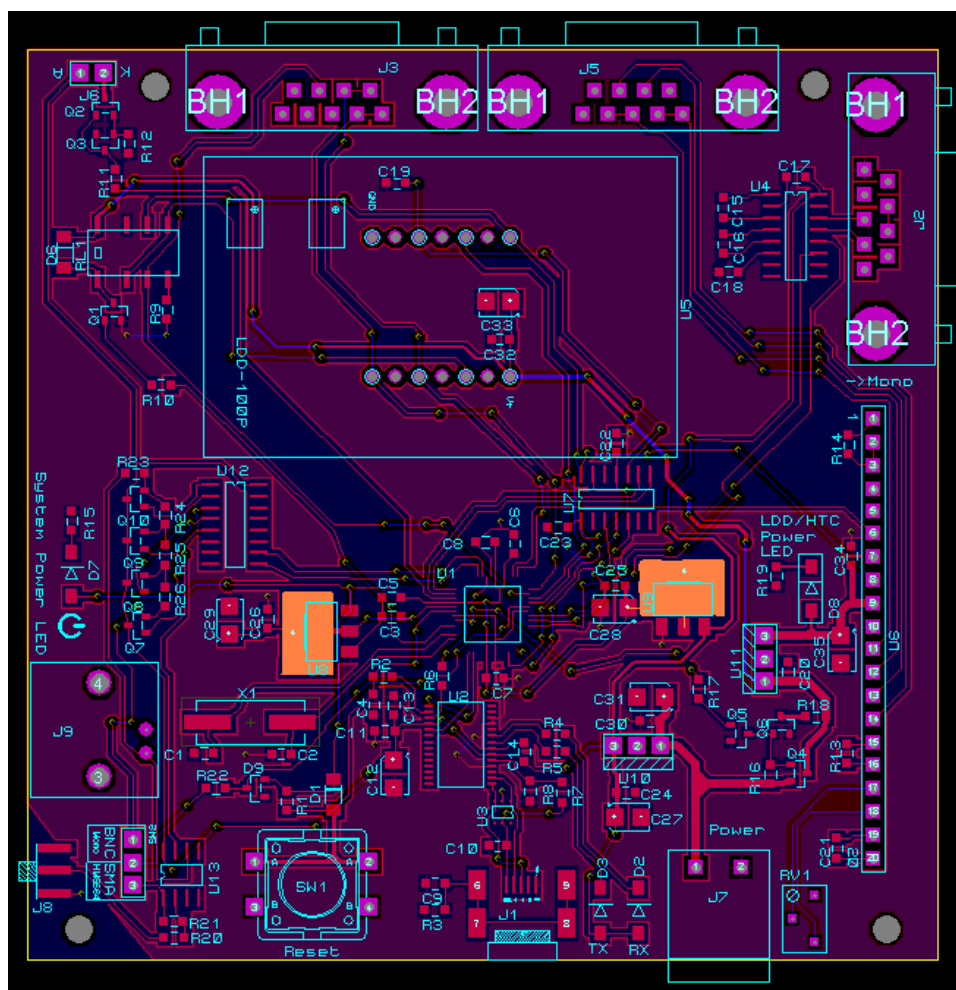


FIGURA B.12: PCB final en el entorno ARES

B.11.4. Modelado 3D

Una de las características más atractivas que ofrece la herramienta *ARES* es la renderización 3D de la PCB a fabricar. Dado que elementos como los reguladores ocupan un amplio espacio en tres dimensiones, resulta muy interesante la visualización 3D del diseño final. Es posible que estos dispositivos, en dos dimensiones no tengan un amplio espacio reservado, pero esto no implica que luego den problemas en volumen. Debido a esta última razón y por obtener un aspecto visual más comercial y profesional, se han incluido los diseños en 3D de todos los componentes que *proteus ARES* no incluía.

El proceso de creación de los nuevos encapsulados que se ha seguido ha sido el siguiente:

1. Búsqueda de los elementos en páginas web que ofrecen elementos 3D como *3DCONTENTCENTRAL* [3]
 - Si se ha encontrado el elemento, se intenta descargar en formato .3ds; si no existe en este formato, se descarga en uno adecuado para su posterior transformación con un programa de edición 3D

- De no encontrarse los elementos 3D, han de hacerse forma manual con cualquier editor de objetos 3D como sketchup, 3ds Max o similares
- 2. Una vez se tiene el encapsulado en el formato correcto (.3ds), se copia en la carpeta correspondiente a las librerías de Proteus. Si se ha realizado la instalación por defecto y se trabaja con la versión de Proteus 7, la ruta será la siguiente:
"C:\Program Files (x86)\Labcenter Electronics
\Proteus 7 Professional\LIBRARY"
- 3. Cuando se dispone del encapsulado en la carpeta, el siguiente paso es añadirlo al diseño. Para ello se selecciona la huella a la que se quiere añadir el encapsulado, se presiona clic derecho y se selecciona "3D Visualization..."
- 4. Se abre el entorno de configuración del elemento. Una vez llegados a este punto, solo hace falta añadir el diseño creado en el punto 1 y centrarlo en las coordenadas X e Y. Como por ejemplo:

```
TYPE=MODEL
FILE=design.3ds
NAME=MODEL
ANGLE=90
X=-1.5
Y=-6.2
```

- 5. Para mayor información sobre cómo posicionar o realizar cambios sobre los encapsulados 3D, se recomienda leer la documentación técnica de ARES [4]

La vista 3D del diseño final de la placa de circuito impreso, diseñada para el sistema actual, se puede ver en la Figura B.13.

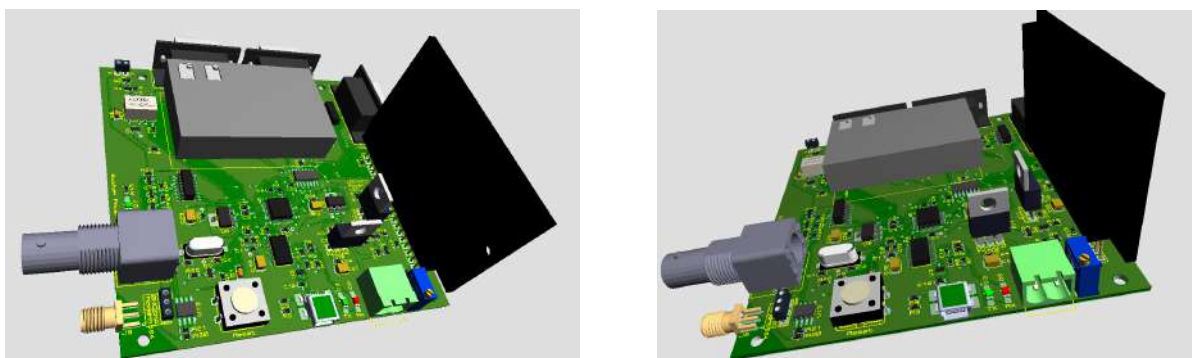


FIGURA B.13: Vistas del diseño 3D

Proteus ARES además ofrece la posibilidad de exportar el diseño 3D en formatos .3ds, .stl y .dxf, lo que permite trabajar con estos diseños 3D en herramientas externas.

Apéndice C

Hojas de especificaciones

A continuación se muestran ciertas hojas de especificaciones, así como los planos del diseño eléctrico que se recomienda tener en cuenta en el transcurso de las sucesivas actualizaciones o con futuras previsiones.

C.1. Thermistor Dale

40071322

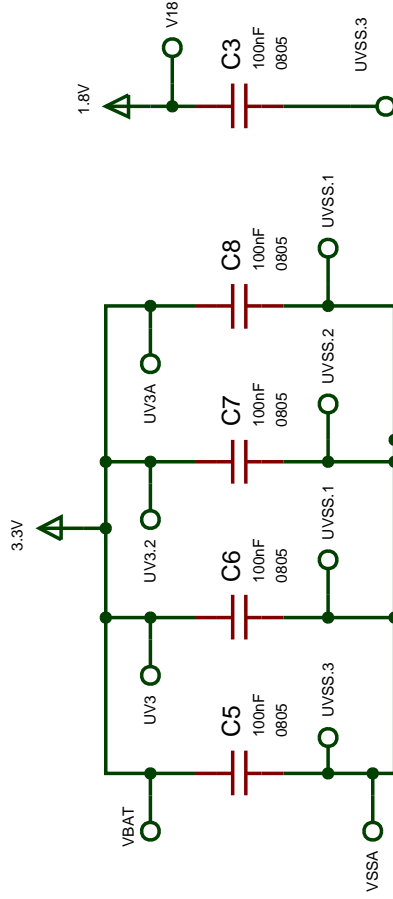
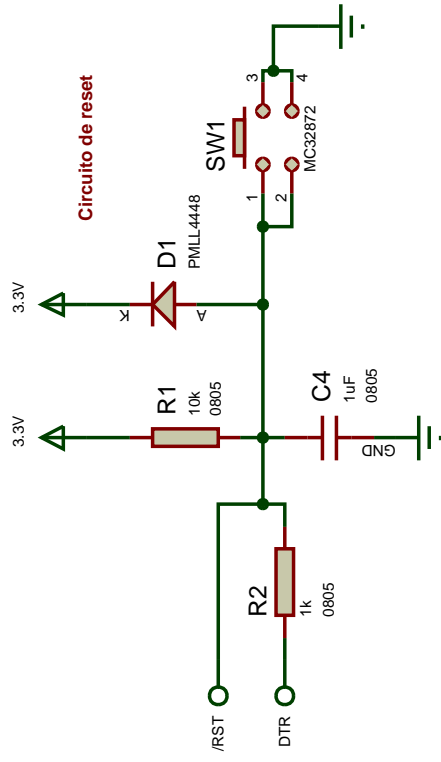
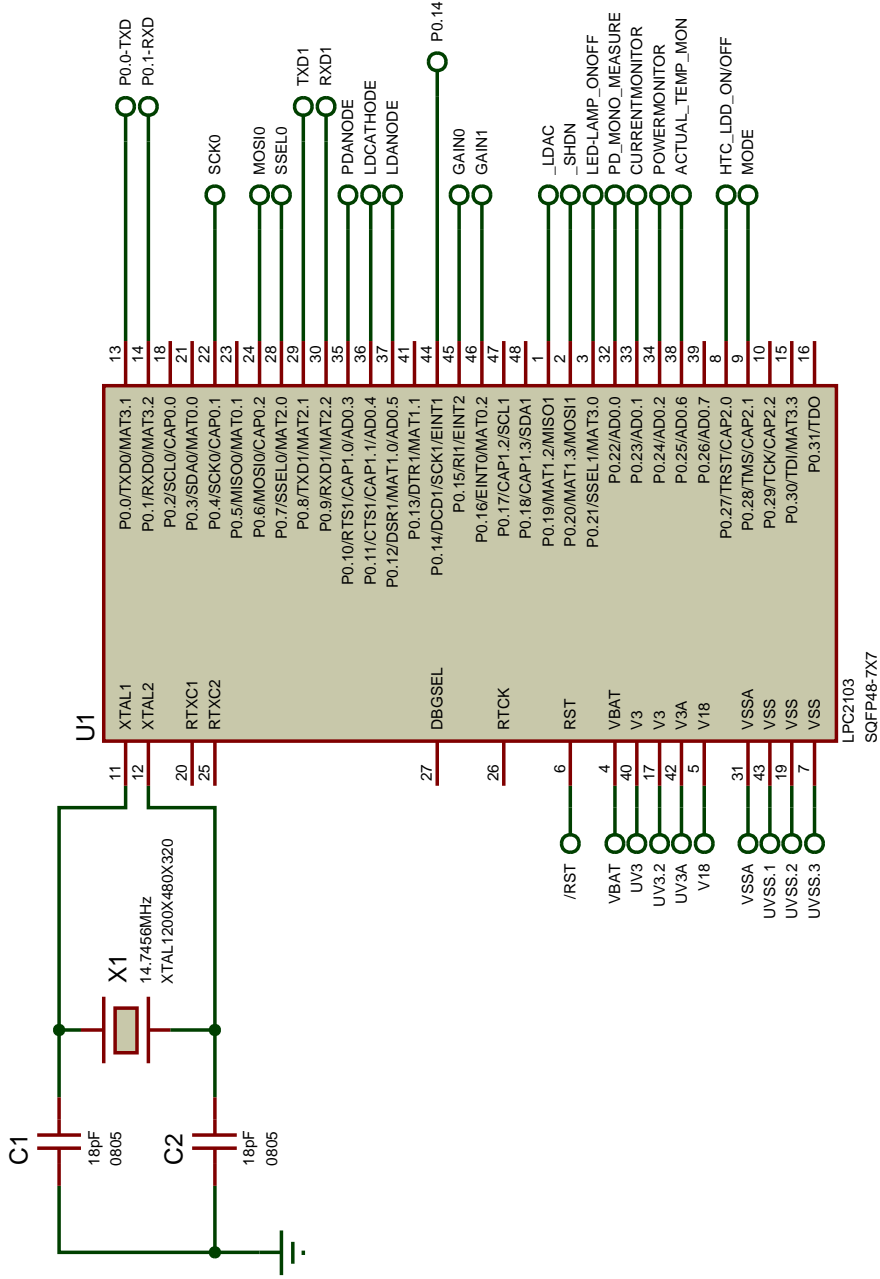
Calibration Table for Dale 1T1002-5 thermistor
 supplied by ILX Lightwave Corp. S/N dl974321
 Calibrated on 11-06-1997

C1 = 1.1120 C2 = 2.3498 C3 = 1.0009

Temp.	Resistance	Temp.	Resistance	Temp.	Resistance
0.0	31963.34	17.0	14219.89	34.0	6835.07
0.5	31173.05	17.5	13902.18	34.5	6696.50
1.0	30404.73	18.0	13592.44	35.0	6561.11
1.5	29657.61	18.5	13290.47	35.5	6428.84
2.0	28931.00	19.0	12996.12	36.0	6299.61
2.5	28224.39	19.5	12709.07	36.5	6173.29
3.0	27537.05	20.0	12429.21	37.0	6049.89
3.5	26868.49	20.5	12156.28	37.5	5929.27
4.0	26218.11	21.0	11890.14	38.0	5811.38
4.5	25585.43	21.5	11630.58	38.5	5696.17
5.0	24969.88	22.0	11377.42	39.0	5583.56
5.5	24370.94	22.5	11130.47	39.5	5473.47
6.0	23788.10	23.0	10889.55	40.0	5365.85
6.5	23220.87	23.5	10654.55	40.5	5260.63
7.0	22668.82	24.0	10425.26	41.0	5157.79
7.5	22131.54	24.5	10201.59	41.5	5057.21
8.0	21608.51	25.0	9983.31	42.0	4958.87
8.5	21099.38	25.5	9770.33	42.5	4862.71
9.0	20603.73	26.0	9562.46	43.0	4768.68
9.5	20121.19	26.5	9359.63	43.5	4676.71
10.0	19651.30	27.0	9161.67	44.0	4586.75
10.5	19193.80	27.5	8968.41	44.5	4498.77
11.0	18748.21	28.0	8779.77	45.0	4412.74
11.5	18314.30	28.5	8595.68	45.5	4328.57
12.0	17891.62	29.0	8415.90	46.0	4246.22
12.5	17479.96	29.5	8240.40	46.5	4165.66
13.0	17078.91	30.0	8069.05	47.0	4086.85
13.5	16688.31	30.5	7901.72	47.5	4009.74
14.0	16307.73	31.0	7738.35	48.0	3934.29
14.5	15936.86	31.5	7578.78	48.5	3860.46
15.0	15575.55	32.0	7422.96	49.0	3788.22
15.5	15223.39	32.5	7270.79	49.5	3717.51
16.0	14880.28	33.0	7122.13	50.0	3648.30
16.5	14545.87	33.5	6976.91	50.5	3580.59

NOTE - For instruments which require the 2-constant Steinhart-Hart approx
 such as the LDT-5525: C1 = 0.954 C2 = 2.606

C.2. Diseño eléctrico



Universidad de Valladolid

FILE NAME: HardwareDesign.DSN

DESIGN TITLE: LPC2103 & Reset

TFG: Caracterización óptica de LD

BY: Guillermo Caminero Fernández

REV: 4

DATE:

10/06/2016

PAGE:

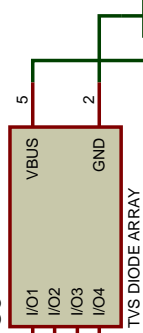
1 of 6

TIME: 11:20:58

Condensadores desacoplo del LPC2103

Circuito de protección (Opcional)

U3



TVS DIODE ARRAY

1 2 3 4 5 6

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

1 2 3 4 5 6 7 8 9

VDD D- D+ NC GND Pat1 Pat2 Pat3 Pat4

MIN-USB-B5

5V

VCCIO

VCCFT232

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

VCCIO

U2

FT232RL

TXD

RXD

_RTS

_CTS

_DTR

_DSR

_DCD

_RI

CBUS0

CBUS1

CBUS2

CBUS3

CBUS4

TEST

Q1

Q2

Q3

Q4

Q5

Q6

Q7

Q8

Q9

Q10

Q11

Q12

Q13

Q14

Q15

Q16

Q17

Q18

Q19

Q20

Q21

Q22

Q23

Q24

Q25

Q26

Q27

Q28

Q29

Q30

U1

MAX232

TXD

RXD

_RTS

_CTS

_DTR

_DSR

_DCD

_RI

CBUS0

CBUS1

CBUS2

CBUS3

CBUS4

TEST

Q1

Q2

Q3

Q4

Q5

Q6

Q7

Q8

Q9

Q10

Q11

Q12

Q13

Q14

Q15

Q16

Q17

Q18

Q19

Q20

Q21

Q22

Q23

Q24

Q25

Q26

Q27

Q28

Q29

Q30

U1

MAX232

TXD

RXD

_RTS

_CTS

_DTR

_DSR

_DCD

_RI

CBUS0

CBUS1

CBUS2

CBUS3

CBUS4

TEST

Q1

Q2

Q3

Q4

Q5

Q6

Q7

Q8

Q9

Q10

Q11

Q12

Q13

Q14

Q15

Q16

Q17

Q18

Q19

Q20

Q21

Q22

Q23

Q24

Q25

Q26

Q27

Q28

Q29

Q30

U1

MAX232

TXD

RXD

_RTS

_CTS

_DTR

_DSR

_DCD

_RI

CBUS0

CBUS1

CBUS2

CBUS3

CBUS4

TEST

Q1

Q2

Q3

Q4

Q5

Q6

Q7

Q8

Q9

Q10

Q11

Q12

Q13

Q14

Q15

Q16

Q17

Q18

Q19

Q20

Q21

Q22

Q23

Q24

Q25

Q26

Q27

Q28

Q29

Q30

C9

10nF

0805

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

C10

100nF

0805

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

GND

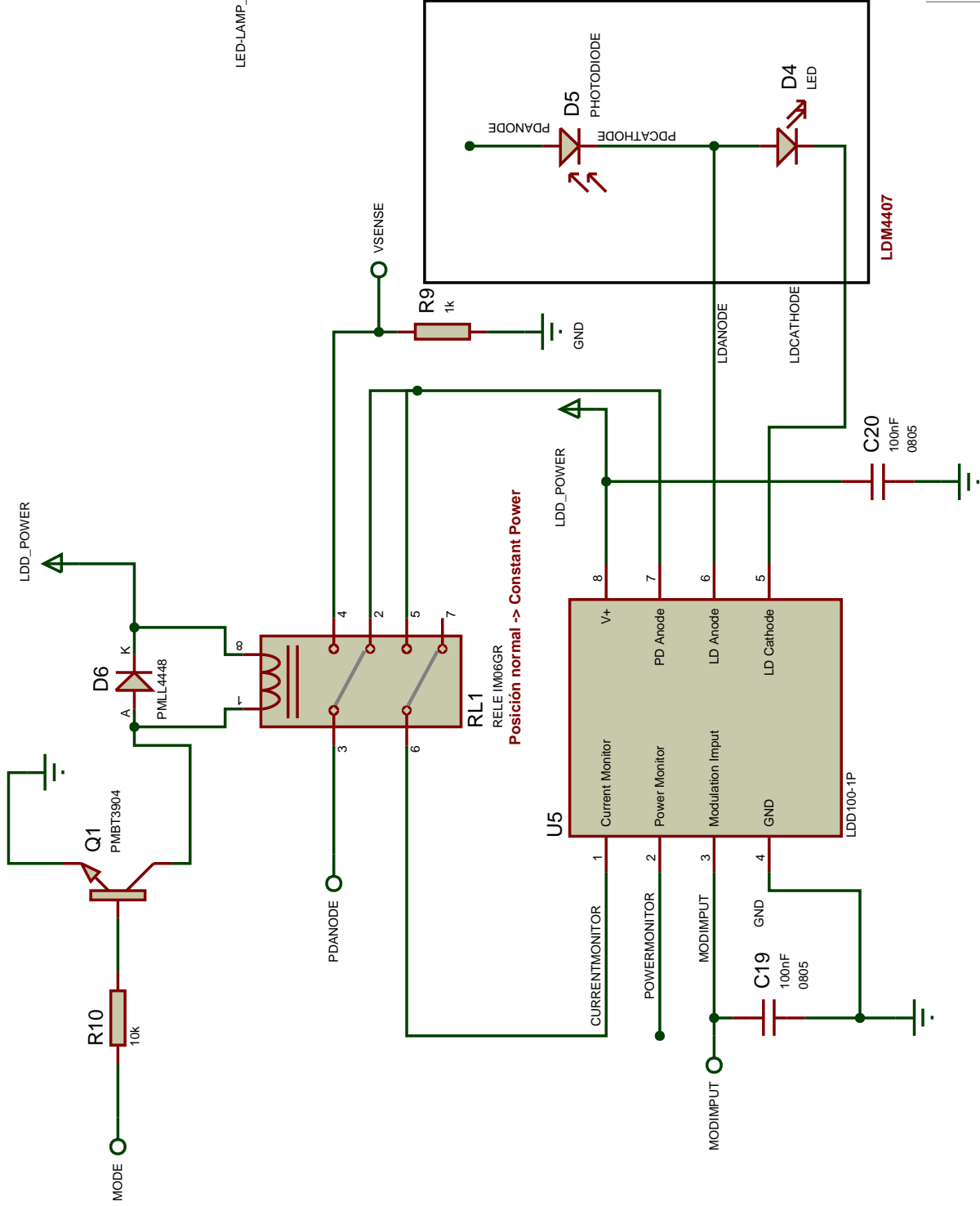
GND

GND

GND

GND

GND



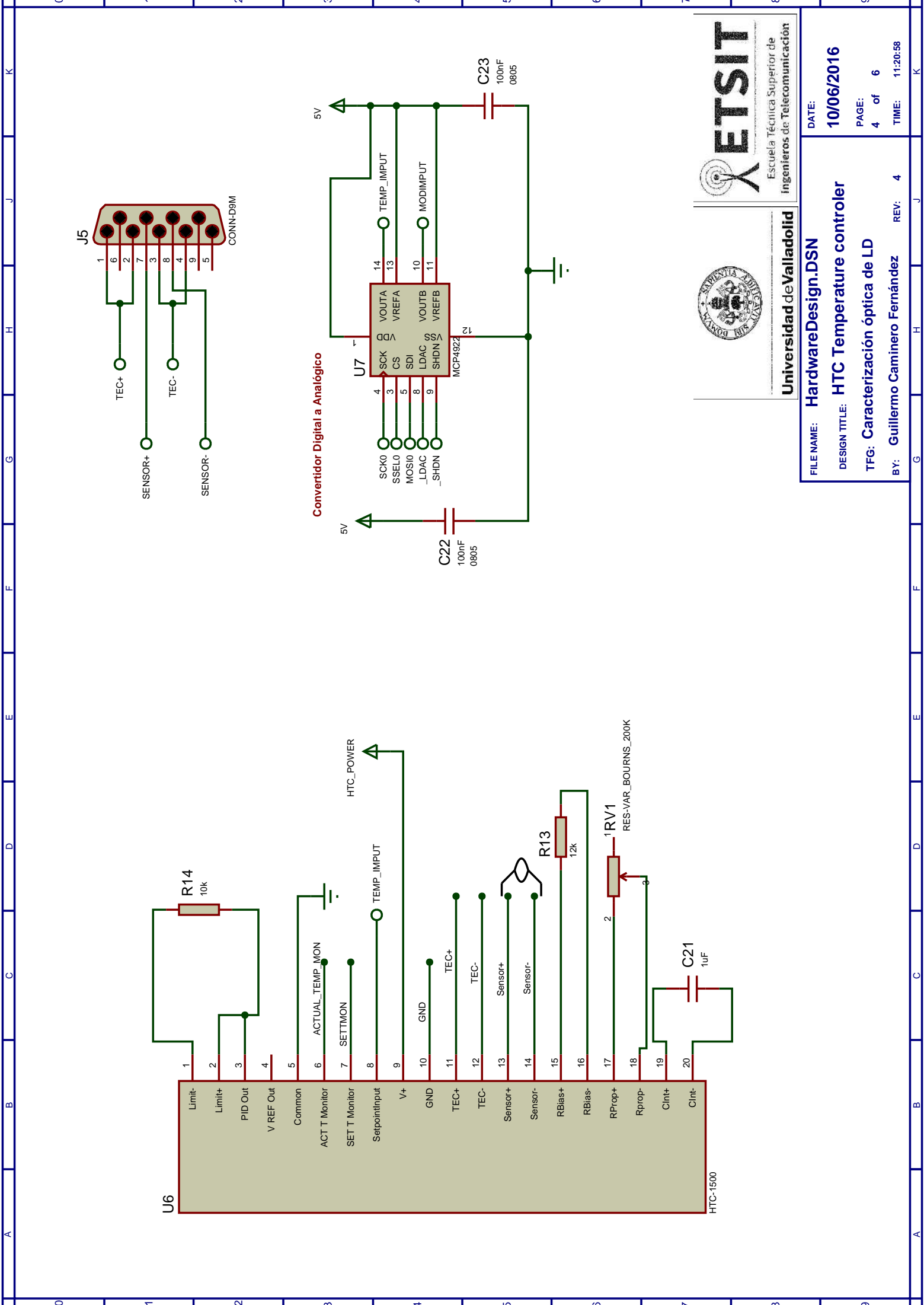
Fuente de corriente para LED
 $I = 650\text{mA} / R12 = 19.7\text{mA}$
 $V_{\text{max}} = 4\text{V}$



Universidad de Valladolid

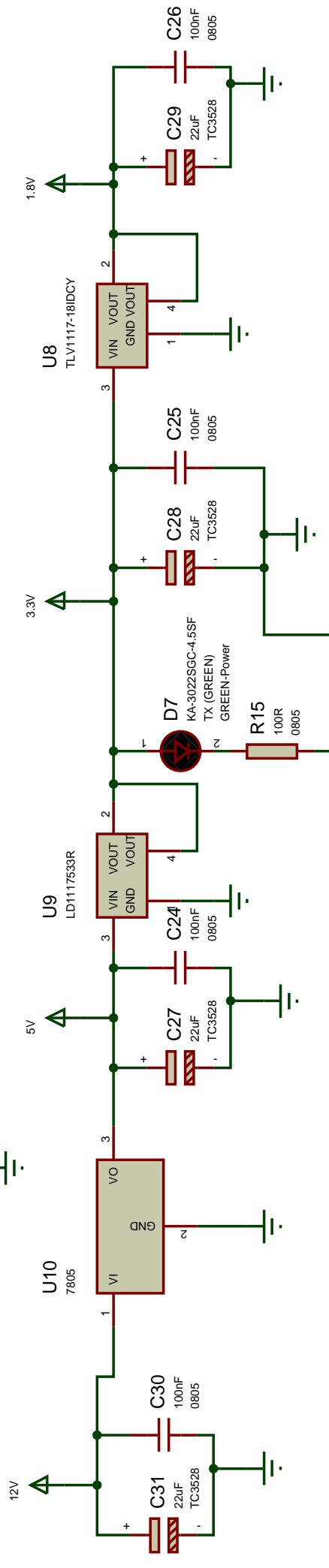
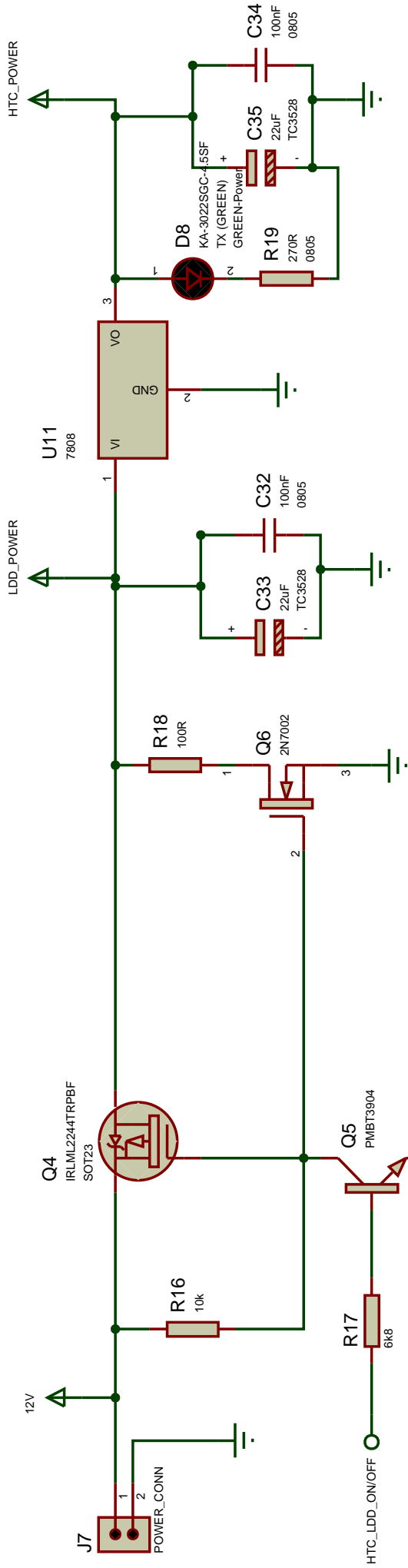
FILE NAME:	HardwareDesign.DSN
DESIGN TITLE:	LDD100-1P & Current source
TFG:	Caracterización óptica de LD
BY:	Guillermo Caminero Fernández
REV:	4

DATE:	10/06/2016
PAGE:	3 of 6
TIME:	11:20:58



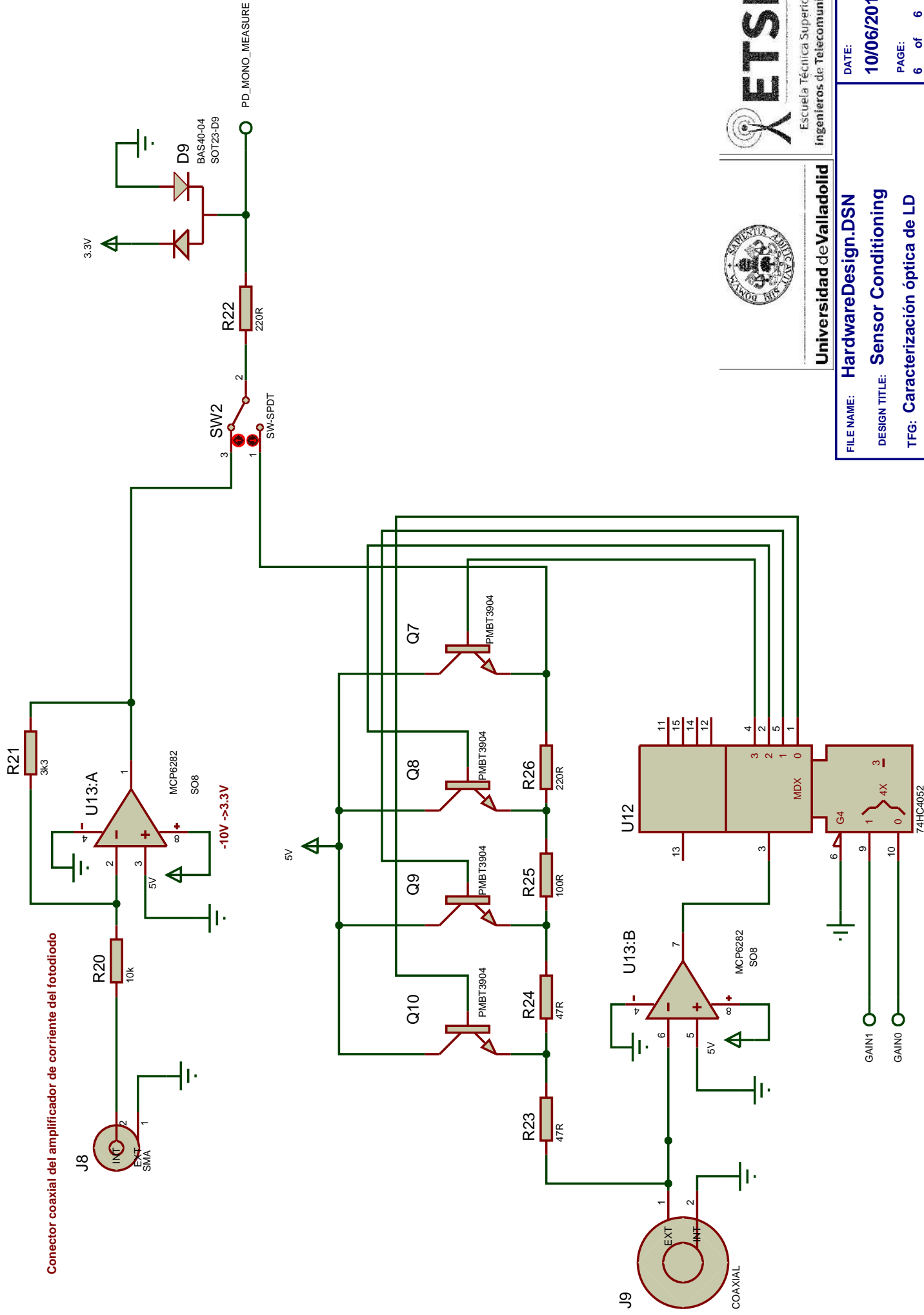
Convertidor Digital a Analógico

FILE NAME:	HardwareDesign.DSN	DATE:	10/06/2016
DESIGN TITLE:	HTC Temperature controler	PAGE:	4 of 6
TFG:	Caracterización óptica de LD	TIME:	11:20:58
BY:	Guillermo Caminero Fernández	REV:	4



FILE NAME:	HardwareDesign.DSN	DATE:	10/06/2016
DESIGN TITLE:	Power	PAGE:	5 of 6
TFG:	Caracterización óptica de LD	TIME:	11:20:58
BY:	Guillermo Caminero Fernández	REV:	4

Conector coaxial del amplificador de corriente del fotodiodo



Universidad de Valladolid

FILE NAME: HardwareDesign.DSN

DESIGN TITLE: Sensor Conditioning

TFG: Caracterización óptica de LD

BY: Guillermo Caminero Fernández REV: 4

DATE:

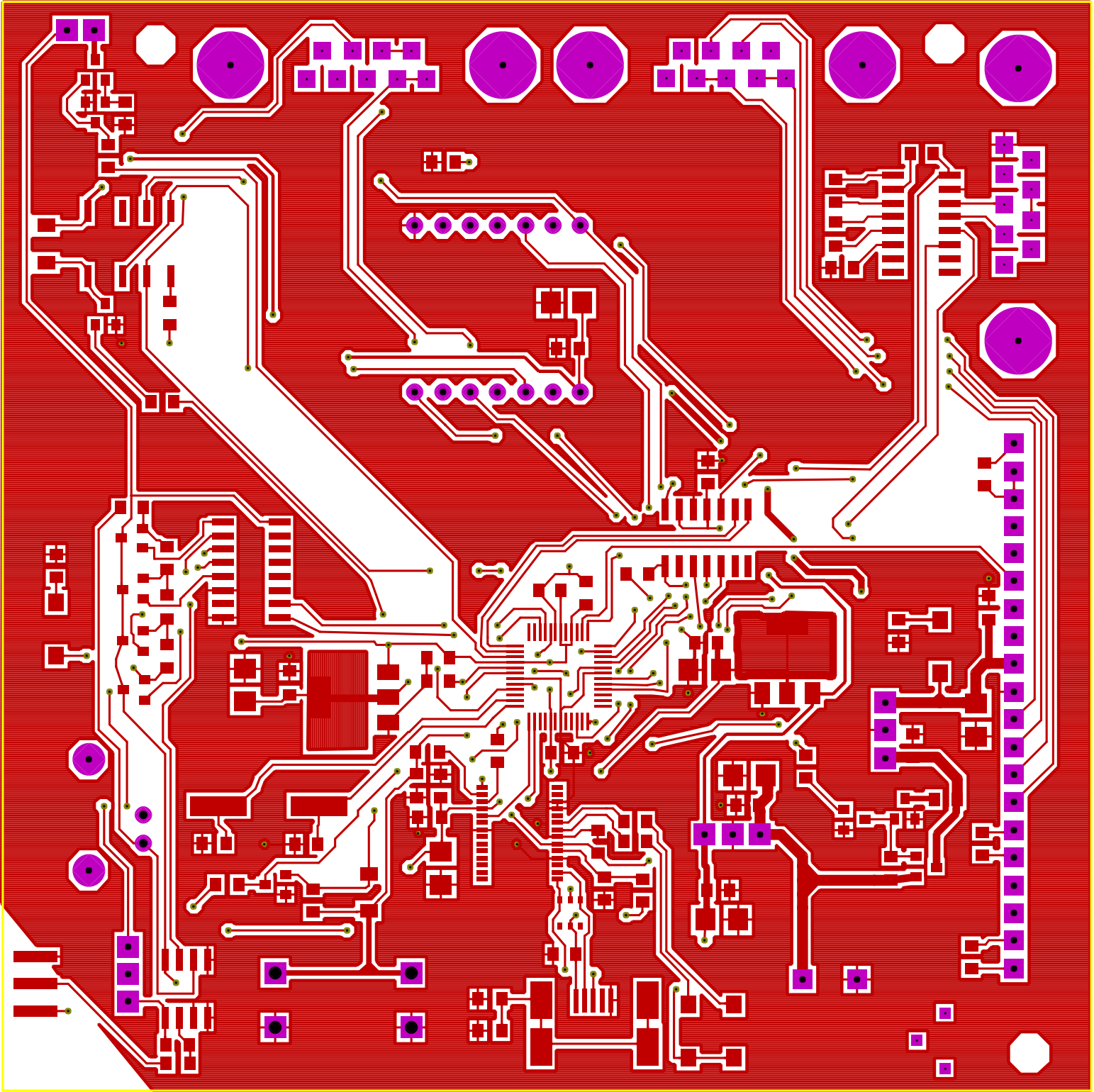
10/06/2016

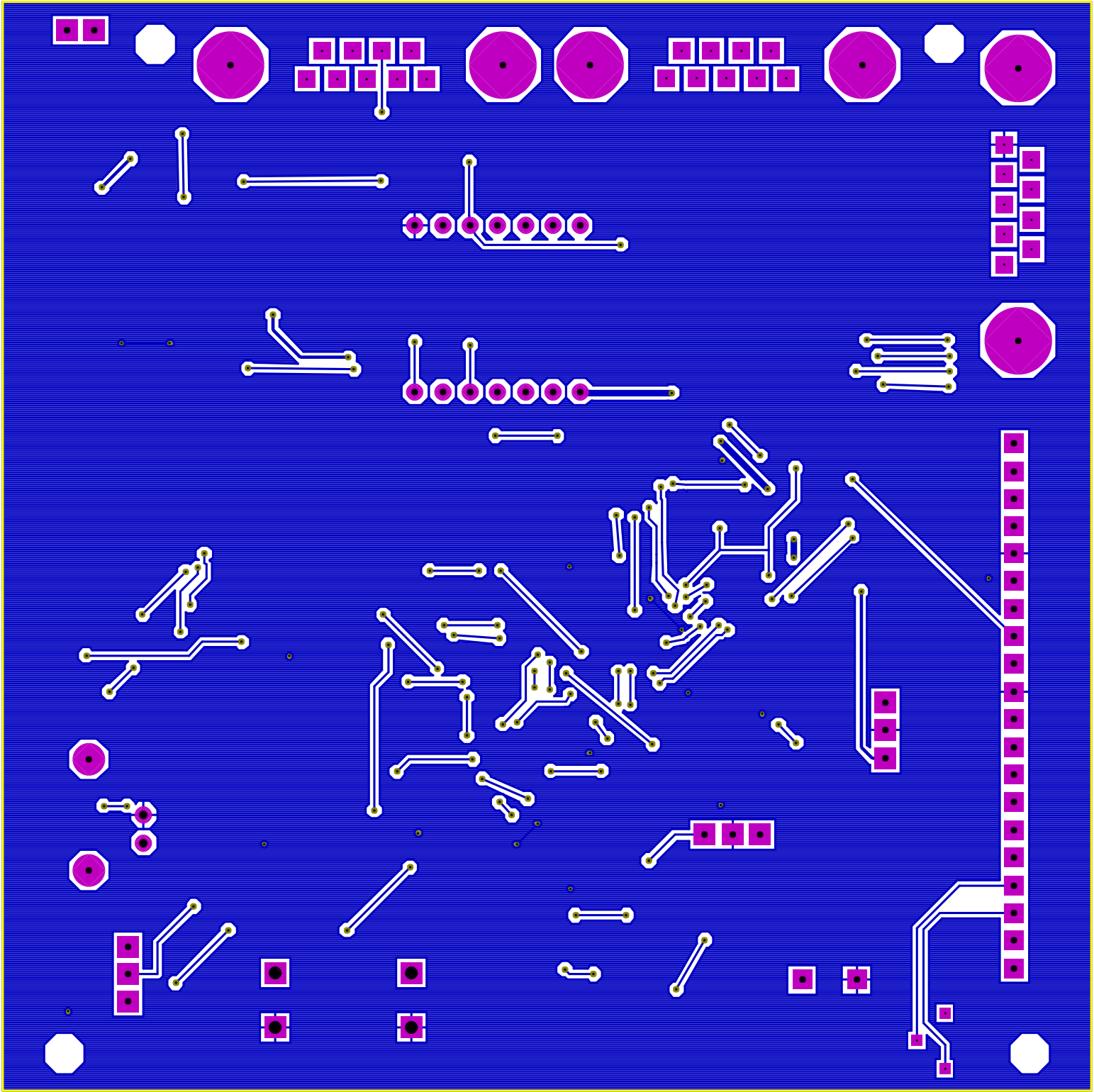
PAGE:

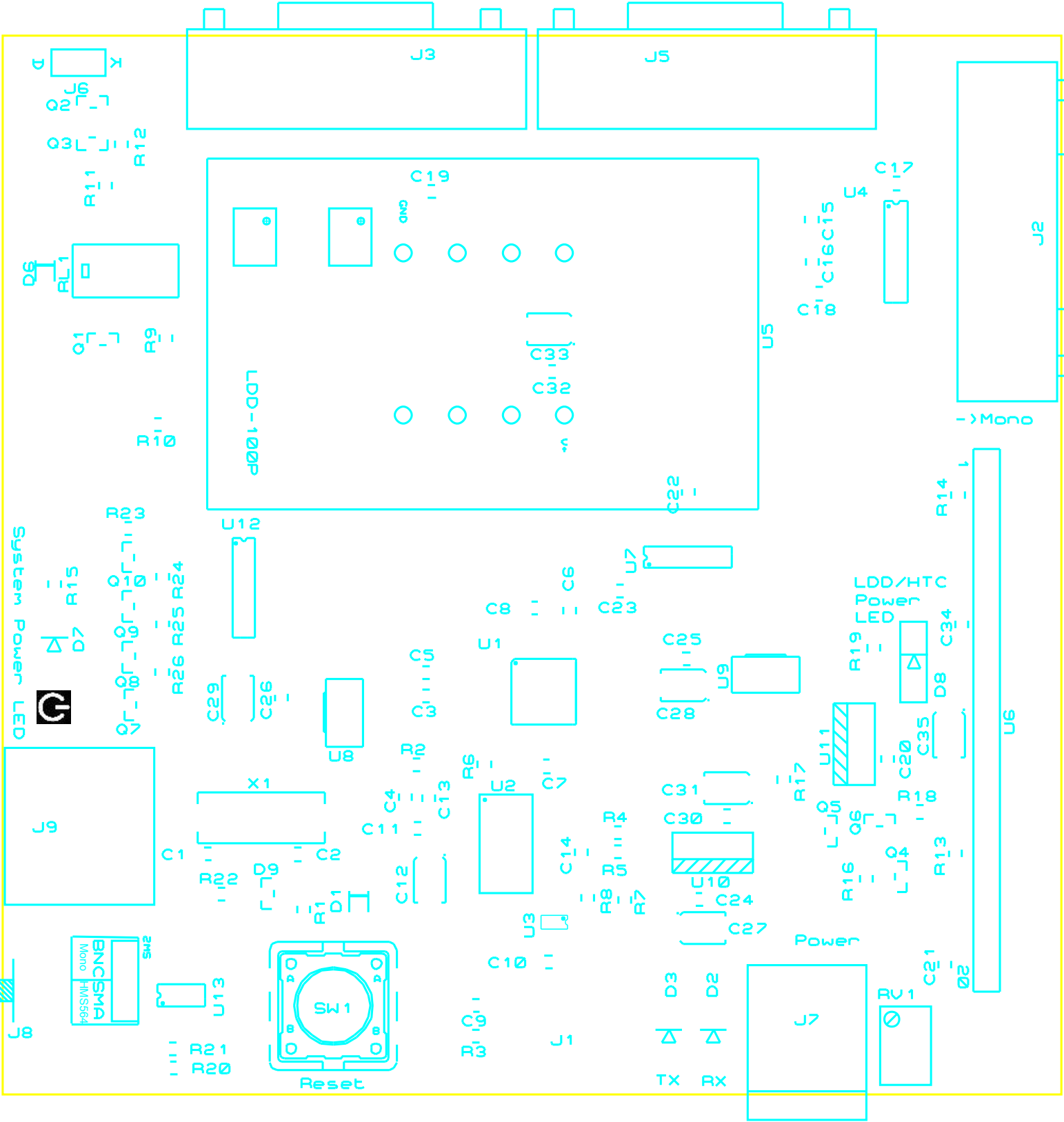
6 of 6

TIME: 11:20:58

C.3. Diseño del layout (Top Copper, Bottom Copper, Top silk)







C.4. Normal Condition of PCB capabilities

Normal Condition of PCB capabilities

Modified on: Sat, 31 Jan, 2015 at 3:00 PM

Layers	1 - 4
Material	FR-4
Board Dimension (max)	380mm X380mm
Board Dimension (min)	10mm X10mm
Outline Dimension Accuracy	± 0.2mm
Board Thickness	0.40mm--2.0mm
Board Thickness Tolerance	± 10%
Dielectric Separation thickness	0.075mm--5.00mm
Conductor Width (min)	0.15mm(Recommend>8mil)
Conductor Space (min)	0.15mm(Recommend>8mil)
Outer Conductor thickness	35um
Inner Conductor thickness	17um--100um
Copper to Edge	>0.3mm
Plated Component,Plated via Diameter(Mechanical)	0.3mm--6.30mm
Plated Hole Diameter Tolerance(Mechanical)	0.08mm
Unplated Hole Diameter Tolerance	0.05mm
Hole Space(min)	0.25mm
Hole to Edge	0.4mm
Annular Ring(min)	0.15mm
Aspect Ratio	8:01
Solder Resist Type	Photosensitive ink
Solder Resist Color	Black , Green, White, Blue ,Yellow
Solder Resist Clearance	0.1mm
Solder Resist Coverage	0.1mm
Plug Hole Diameter	0.3mm--0.65mm
Selective Finish	HASL, ENIG
Silkscreen line width (mim)	6mil

Note: Buried via and blind via are not supported.

C.5. PCB Panelization Rules

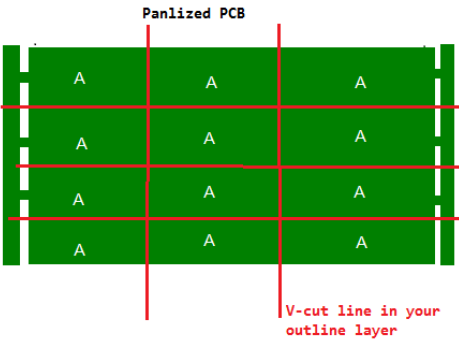
Something you need to know, if your design is a panel.

First! Check the service you placed is small batch order or prototyping service, cause the rules for them are different.

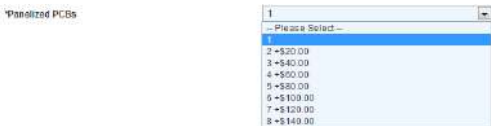
1, For Small Batch Service-----Panelized Design

If each piece in your panelized PCB is the same(like the following example), we can apply V-CUT for your board without extra fee. And please make sure your panel meet [the following requirement](#) for V-cut.

- a)The size of your panel shall be large than 7*7CM, each sub- board shall be large than 1*1cm.
- b) put the v-cut line in outline/dimension layer (GKO/GML). In Eagle, put in layer 46&50.



For “Panelized PCBs” option, you shall choose “1”.



And Attention!

If each piece in your panel is not the same, for example, it contains two different designs, then you shall choose “2”.



One More Thing, the quantity of your different designs in panel shall be the same. otherwise we can not make sure v-cut can be applied to your panel. V-cut will go though the panel and can not stop int the middle, so please well design your panel.

2 For Prototyping Service----- Panelized Design

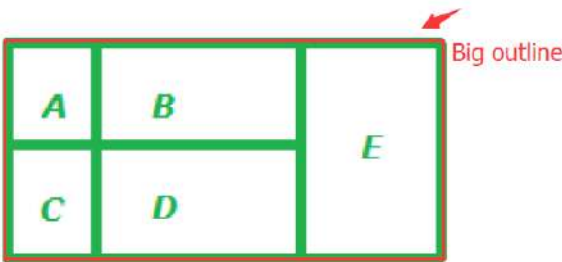
You can penalize [different or same boards](#) in your panel, but [fee v-cut is not included](#) in prototyping service. We will not v-cut or divide the board for you. Which means we will make the board as a big panel according to your outer outline.

If your design requires v-cut or dividing, it will cost you extra fee, please [contact us](#).

Want a big panel without v-cut, please make sure:

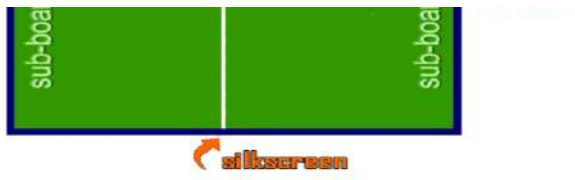
- a) Make sure there is a big outline for your panel, you can design this big outline in your keep-out layer, and if you want some individual outlines for your small boards, that is OK, please put these outlines into your silk screen layer.

a-1



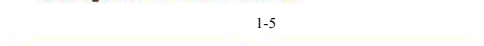
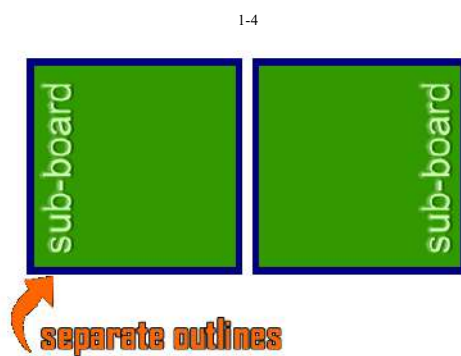
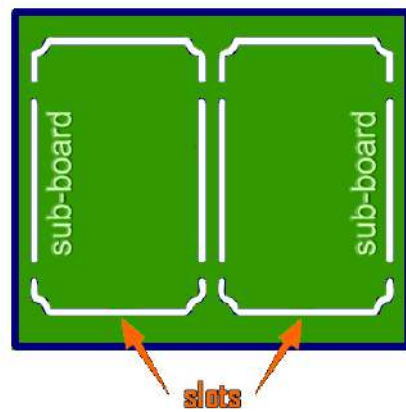
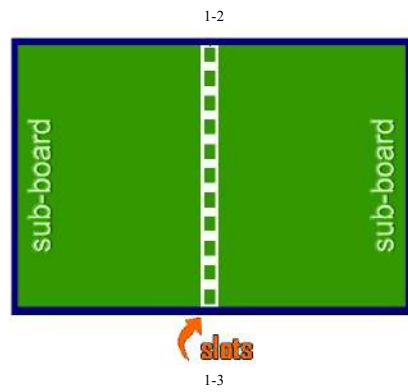
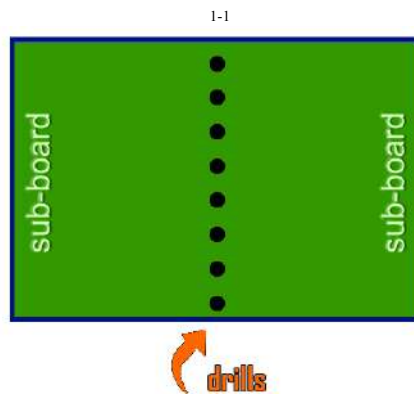
a-2

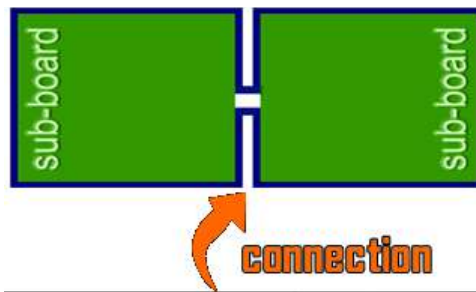




More Tips, this prototyping service of us is for one simple and unique design. If my dear you use drills, slots, separate outlines to divide your board (like the condition below), it may cost you extra fee for it.

(The panel contains 2 sub-boards for instance,)





(Note: For 1-5, if the connection is **small** than $\frac{1}{3}$ dimension of your panel, it will cost you extra fee, vice versa. And 2 sub-boards = 2 design, no matter the sub-boards are the same or different)

More information, please just feel free to contact with us.
And advice or complain about this rule, don't hesitate to tell us.
Contact Email: emmy.yin@itead.cc Skype: [email.yin](#)

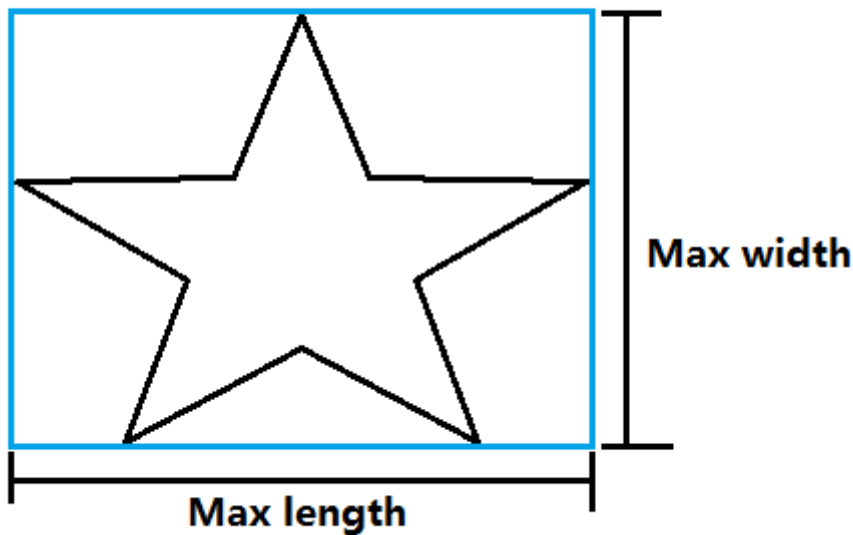
C.6. Requirements on the PCB Design

Requirements on the PCB Design

Modified on: Tue, 27 Jan, 2015 at 4:20 PM

1. Measure the length and width of the board.

No matter what shape your PCB design is, the length and width must take the max values. You should type the max values into the PCB width and length columns when place the small batches PCB order.

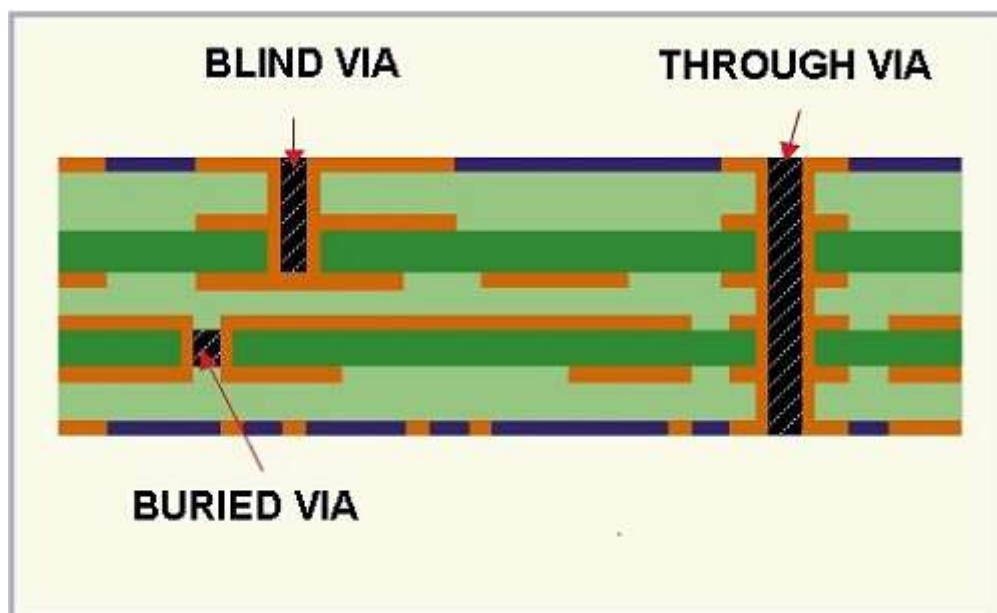


2. About Silkscreen

silkscreen line width (min: 6mil)

silkscreen text height (min: 32mil)

3. About Via



Blind via and buried via are not within our capability for the moment. In other words, only through via will be accepted.

C.7. Gerber Files Requirements

Gerber Files Requirements

Modified on: Tue, 13 Jan, 2015 at 6:07 PM

1. Gerber files needed for 1-layer PCB boards:

Bottom/Top layer: pcbname.GBL/GTL

Solder Stop Mask Bottom/top: pcbname.GBS/GTS

Silk Bottom/Top: pcbname.GBO/GTO

NC Drill: pcbname.TXT

2. Gerber files needed for 2-layer & 4-layer PCB boards:

Top layer: pcbname.GTL

Inner Layer 1: pcbname.GL1 (for 4-layer board)

Inner Layer 2: pcbname.GL2 (for 4-layer board)

Bottom layer: pcbname.GBL

Solder Stop Mask top: pcbname.GTS

Solder Stop Mask Bottom: pcbname.GBS

Silk Top: pcbname.GTO

Silk Bottom: pcbname.GBO

NC Drill: pcbname.TXT

Outline layer: pcbname.GKO or pcbname.DO

Note:

- All the gerber files must be in **RS-274x format**, except the drill file should be in **Excellon format**.
- If there is **no pcbname.GKO or DO file**, please make sure the PCB outline or shape shall at least be specified in other layer, silkscreen or soldermask layer etc.
- If soldermask layers are not required, please clarify surface finish for both sides when you submit your gerber files.

How to generate Gerber files from KiCad or Eagle

<http://blog.iteadstudio.com/how-to-generate-gerber-files-from-kicad/> (<http://blog.iteadstudio.com/how-to-generate-gerber-files-from-kicad/>)

<http://blog.iteadstudio.com/how-to-export-gerber-files-from-eagle/> (<http://blog.iteadstudio.com/how-to-export-gerber-files-from-eagle/>)

Bibliografía

- [1] ACTON. *Operating Instructions Monochromator / Spectrograph Acton SP-300i*. 1997. URL: <ftp://ftp.princetoninstruments.com/Public/Manuals/Acton/Sp-300i.pdf>.
- [2] ARMKEIL. *Microcontroller Tools*. NXP (founded by Philips) LPC2103. 2016. URL: <http://www.keil.com/dd/chip/3974.htm>.
- [3] 3D ContentCentral®. *FREE 3D and 2D CAD Models of User-Contributed and Supplier-Certified Parts, Assemblies and more*. 2016. URL: <http://www.3dcontentcentral.com/Default.aspx>.
- [4] Hubor. *Primeros pasos con ARES Proteus 7*. Sep. de 2015. URL: <http://hubor-proteus.com/recursos/gu%C3%ADas-primeros-pasos/146-primeros-pasos-con-ares.html>.
- [5] Hubor. *Primeros pasos con ISIS Proteus 7*. Sep. de 2015. URL: <http://hubor-proteus.com/recursos/gu%C3%ADas-primeros-pasos/114-primeros-pasos-con-isis.html>.
- [6] Microchip Technology Inc. *MCP4902/4912/4922. 8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface*. 2010. ISBN: 978-1-60932-129-1. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22250A.pdf>.
- [7] Color and Vision Research Labs. *Luminous efficiency functions*. 2015. URL: <http://www.cvrl.org/>.
- [8] Color and Vision Research Labs. *Stockman and Sharpe cone fundamentals*. 2015. URL: <http://www.cvrl.org/>.
- [9] J.M. Lerner y A. Thevenon. *Gratings de bragg*. HORIBA, Ltd. 1996-2016. URL: <http://www.horiba.com/us/en/scientific/products/optics-tutorial/>.
- [10] Jesús M. Hernandez Mangas. *Interconexión de Sistemas Electrónicos*. UVA. 2015.
- [11] Salvador Mateos Velasco. «Diseño Hardware de un sistema de caracterización de diodos láser». Tesis de mtría. Universidad de Valladolid, 1999.
- [12] Miklor. *USB Cables and Drivers for Microsoft XP, Vista Win7, Win8, Win10*. 2016. URL: http://www.miklor.com/COM/UV_Drivers.php.
- [13] NXP. *LPC2101/02/03 User manual*. Ver. 4. 2009. URL: www.nxp.com/documents/user_manual/UM10161.pdf.
- [14] Ankit Rohatgi. *WebPlotDigitizer. Web based tool to extract data from plots, images, and maps*. 2016. URL: <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>.
- [15] NXP Semiconductors. *Página oficial de NXP*. 2016. URL: <http://www.nxp.com/>.
- [16] Elitima Software. *Serial Port Monitor*. Eltima LLC. 2000-2016. URL: <http://www.eltima.com/products/serial-port-monitor/>.

- [17] ITEAD STUDIO. *Normal Condition of PCB capabilities*. Ene. de 2015. URL: <http://support.iteadstudio.com/support/solutions/articles/1000156313-normal-condition-of-pcb-capabilities>.
- [18] ITEAD STUDIO. *Requirements on the PCB Design*. Ene. de 2015. URL: <http://support.iteadstudio.com/support/solutions/articles/1000156316-requirements-on-the-pcb-design>.
- [19] UNAD. *Instrumentación de la espectrofotometría UV-VIS*. 2015. URL: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401539/>.
- [20] David Va y Kuboode. *How to make a self-extracting installer for Linux*. 2012. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B2bM-FY2vDS0M01LVGpoUjdTcjQ/view>.
- [21] Team Wavelength. *HTC Series. Low Profile, Efficient Temperature Controllers. Low Noise Driver for Laser Diodes*. 2011. URL: <http://www.teamwavelength.com/downloads/datasheets/htcseries.pdf>.
- [22] Team Wavelength. *LDD-P series. Laser Diode Drivers*. 2013. URL: <http://www.teamwavelength.com/downloads/datasheets/lddpseries.pdf>.
- [23] Inc. Wavelength Electronics. *Safe Operating Area Calculator For Laser Diode Drivers*. 2008-2016. URL: <http://www.teamwavelength.com/support/calculator/soa/soald.php>.