



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Estudio de alternativas de diseño de medidas ópticas para señales bajas. Desarrollo de módulos de medida de color.

Alternative optic measure design for low amplitude signals. Development of colour measure device.

Autor

Ignacio Ayora Morante

Director

Carlos Heras Vila

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dña. IGNACIO AYORA MORANTE

con nº de DNI 18173638-G en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

MÁSTER, (Título del Trabajo)

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE
MEDIDAS ÓPTICAS PARA SEÑALES BAJAS.

DESARROLLO DE MÓDULOS DE MEDIDA
DE COLOR.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 1 DE SEPTIEMBRE 2016

Fdo: IGNACIO AYORA MORANTE

Agradecimientos

Gracias a todos los miembros del Grupo de Tecnologías Fotónicas de la Universidad de Zaragoza, especialmente a Carlos, Íñigo, Cristina, Marta, Pilar y Rafa por su colaboración en el diseño y puesta a punto de los prototipos, así como por ceder el código y los diseños de sus trabajos originales.

Estudio de alternativas de diseño de medidas ópticas para señales bajas. Desarrollo de módulos de medida de color.

RESUMEN

Aunque el Grupo de Tecnologías Fotónicas del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón ha implementado indistintamente amplificadores Lock-in analógicos y digitales, pocos estudios se han centrado en comparar sus prestaciones en aquellas situaciones en la que el nivel de señal a ruido es muy bajo. Uno de los objetivos de este trabajo busca esclarecer las diferencias entre ambos tipos de amplificadores Lock-in gracias al diseño de un sistema en el que el bloque de detección sea común, permitiendo una comparación adecuada.

En segundo lugar, este trabajo acomete el diseño de un espectrofotómetro en línea capaz de medir en tiempo real la reflexión y la transmisión de un vidrio con capa, con la finalidad de detectar sus posibles inhomogeneidades, y la fabricación y experimentación de uno de sus cinco módulos. Todo ello en colaboración con la empresa Ariño Duglass S.A. y el Grupo de Tecnologías Fotónicas del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón.

Palabras clave: Espectrofotómetro. Amplificador Lock-in. Analógico. Digital.

Alternative optic measure design for low amplitude signals. Development of colour measure device.

ABSTRACT

Although the Group of Photonics Technologies from the Institute of Engineering Research of Aragón has implemented both analogue and digital Lock-in amplifiers, only a few studies have focused on comparing their performance in situations where the signal to noise level is very low. One of the main objectives of this thesis is to find the differences between the two types of Lock-in amplifiers thanks to the design of a system in which both amplifiers share the same detection block, thus creating an easy comparison.

Secondly, this thesis tackles the design of an online spectrophotometer which is able to measure in real time the reflexion and transmission of glass, with the purpose of detecting possible inhomogeneities. All this will take place with the collaboration of Ariño Duglass S.A. company and the Group of Photonic Technologies from the Institute of Engineering Research of Aragón.

Key words: Spectrophotometer. Lock-in amplifier. Analog. Digital.

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
2	Estudio comparativo de Lock-in analógico y digital para señales ópticas bajas.....	3
2.1.	Introducción.....	3
2.2.	Diseño de la electrónica.....	4
2.2.1.	Placa E (emisora).....	5
2.2.2.	Placa D (detectora).....	6
2.3.	Desarrollo software de medida	7
2.4.	Montaje del sistema	8
2.5.	Medidas.....	10
2.5.1.	Comparación digital-analógico.....	11
2.5.2.	Comparación entre filtros Lock-in digital.....	11
3	Desarrollo de módulos de medida de color	13
3.1.	Introducción.....	13
3.2.	Consideraciones previas al diseño del sistema	14
3.2.1.	Derivas	14
3.2.2.	Procesado de múltiples amplificadores Lock-in.....	14
3.2.3.	Adquisición de múltiples señales	16
3.2.4.	Crosstalk	16
3.3.	Pruebas de validación de Arduino.....	16
3.3.1.	Generación de 2 señales de modulación con Arduino	17
3.3.2.	Precisión de las frecuencias generadas con Arduino	18
3.3.3.	Comunicación radiofrecuencia entre Arduinos.....	19
3.3.4.	Comunicación XBee Arduino-PC.....	20
3.4.	Diseño del sistema.....	21
3.4.1.	Diseño de la mecánica	21
3.4.2.	Diseño de la electrónica.....	22
3.4.3.	Diseño software	25
3.5.	Montaje.....	28
4	Testeo y experimentación del módulo	31
4.1.	Estabilidad y tiempo de medida.....	32
4.2.	Crosstalk	34
4.3.	Estabilidad en ciclo.....	35
4.4.	Medida de muestras con capa	36
5	Conclusiones	39

6 Bibliografía	41
ANEXOS.....	43
A Testeo del diodo LED número 4	45
B Verificación crosstalk.....	47
C Planos.....	49
D Esquemáticos	51
E Código Arduino.....	57
F Inventario.....	61
G Datasheets	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema.	4
Figura 2.2. Esquemático de la placa emisora.	5
Figura 2.3. Esquemático de la placa receptora.	6
Figura 2.4. Interfaz gráfica del amplificador Lock-in digital.	8
Figura 2.5. Diseño en Eagle de la placa PCB emisora (izq.) y detectora (drcha.).....	9
Figura 2.6. Resultado final de la placa emisora(izq.) y detectora (drcha.).	9
Figura 2.7. Montaje inicial para experimentación.	9
Figura 2.8. Respuesta espectral del fotodiodo S1336.	10
Figura 2.9. Comparación del amplificador Lock-in analógico con el digital.	11
Figura 2.10. Comparación del amplificador Lock-in digital variando la frecuencia de corte.	12
Figura 3.1. Esquema del sistema espectrofotómetro.....	14
Figura 3.2. Código implementado en Arduino para configurar el Timer 1.	17
Figura 3.3. Señales cuadradas de la misma frecuencia, generadas por dos Arduinos distintos. ...	18
Figura 3.4. Montaje de experimentación de la comunicación RF.....	19
Figura 3.5. Pruebas realizadas con XBee.	20
Figura 3.6. Esquema del diseño de los bloques.....	22
Figura 3.7. Esquema de montaje de las placas.....	23
Figura 3.8. Esquemático de la placa A.....	23
Figura 3.9. PCB de la placa A.	24
Figura 3.10. Esquemático de la placa B.....	24
Figura 3.11. PCB de la placa B.....	24
Figura 3.12. Representación sin promediado (izq.) y con promediado de muestras (drcha.).....	25
Figura 3.13. Interfaz gráfica de la aplicación de escritorio.....	27
Figura 3.14. Esquema de distribución de clases.	27
Figura 3.15. Pantalla de configuración.....	28
Figura 3.16. Bloque de medición de referencia y reflexión.	28
Figura 3.17. Módulo prototipo testeando dos vidrios.....	29
Figura 4.1. Espectro de emisión de los 6 diodos LED.	32
Figura 4.2. Pantalla inicial del creador de filtros.	33
Figura 4.3. Diseño del filtro paso bajo de dos etapas.....	33
Figura 4.4. Comparación frecuencia de corte del filtro paso bajo.	33
Figura 4.5. Desviación para la medida de reflexión.....	35
Figura 4.6. Desviación para la medida de transmisión.....	36
Figura 4.7. Vidrio 1. Comparativa del módulo desarrollado frente a espectrofotómetro de laboratorio.	36
Figura 4.8. Vidrio 2. Comparativa del módulo desarrollado frente a espectrofotómetro de laboratorio.	37
Figura A.1. Diagrama de radiación del diodo LED número 4.1.....	46
Figura A.2. Diagrama de radiación del diodo LED número 4.2.....	46
Figura B.1. Fotografía de los haces de luz proyectados a una distancia de 15cm.....	48
Figura B.2. Mecanizado final de la pieza.....	48
Figura C.1. Perfil superior del bloque.	49
Figura C.2. Vista general del bloque diseñado en SolidWorks.....	50
Figura C.3. Perfil lateral del bloque.	50
Figura C.4. Perfil frontal del bloque.....	50
Figura D.1. Esquemático de la placa E.	51
Figura D.2. Visión completa del esquemático de la placa R.	52

Figura D.3. Bloque detector. Esquemático de la placa R.....	52
Figura D.4. AD630. Esquemático de la placa R.....	52
Figura D.5. Filtro paso bajo. Esquemático de la placa R.	53
Figura D.6. PCB de la placa E.....	53
Figura D.7. PCB de la placa R.	53
Figura D.8. Visión completa del esquemático de la placa A.....	54
Figura D.9. Bloque detector. Esquemático de la placa A.....	54
Figura D.10. AD630. Esquemático de la placa A.....	54
Figura D.11. Filtro paso bajo. Esquemático de la placa A.....	55
Figura D.12. Esquemático de la placa B.	55
Figura D.13. PCB de la placa A.....	56
Figura D.14. PCB de la placa B.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Frecuencia de corte y tiempo de respuesta de los 4 filtros testados.....	12
Tabla 4.1. Numeración de los LEDs.....	31
Tabla 4.2. Estabilidad de las medidas.....	32
Tabla 4.3. Estabilidad de las medidas con el nuevo filtro.....	34
Tabla 4.4. Amplitudes obtenidas (mV) tapando uno de los LEDs.	34
Tabla 4.5. Caracterización Crosstalk. Medidas en tanto por ciento.....	35
Tabla A.1. Estabilidad de las medidas.....	46
Tabla B.1. Amplitudes obtenidas en milivoltios, tapando uno de los LEDs.....	47
Tabla B.2. Caracterización inicial del Crosstalk. Medido en tanto por ciento.....	47
Tabla F.1. Listado de los diodos LED utilizados.	61

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo fin de máster se ha desarrollado dentro del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) de la Universidad de Zaragoza, y se enmarca dentro de una de las líneas que mantiene el grupo para el desarrollo de equipos de medida óptica específicos para diferentes empresas, principalmente en el contexto de la colaboración con la empresa Ariño Duglass S.A.

El trabajo fin de máster tiene un doble objetivo. Por un lado, conocer el comportamiento comparativo entre el amplificador Lock-in analógico y el digital en el caso de señales con relación señal a ruido pequeñas debido a que la señal óptica disponible es muy baja. Y, por otro lado, desarrollar un espectrofotómetro en línea dedicado al control de la producción de vidrios que trabaje en tiempo real para la línea de producción de vidrios con capa, para el sector arquitectónico, de la planta de Ariño Duglass.

El amplificador Lock-in cobra especial importancia en este trabajo debido a que esta tecnología será la base sobre la que se diseñará el espectrofotómetro. En los últimos años, el GTF ha estado desarrollando e implementando indistintamente amplificadores Lock-in digitales y analógicos. Sin embargo, no se ha realizado un análisis específico de su comportamiento en condiciones de señales ópticas muy bajas. Por lo tanto, el primer objetivo de este trabajo consiste en la implementación de un sistema que permita la comparativa de las dos alternativas Lock-in de forma fiable y precisa. Para ello, se ha diseñado y fabricado un sistema en el que el amplificador Lock-in analógico y el digital compartan circuito de detección, y que permita su intercambio e

intercomparación de forma sencilla. Todo este proceso de desarrollo junto con el estudio de la comparativa de los Lock-in están recogidos en el capítulo 2.

El segundo objetivo del trabajo consiste en el diseño y la fabricación de un espectrofotómetro capaz de testear en tiempo real, a la salida de la línea de producción, las propiedades de reflexión y transmisión de un vidrio con capa, asegurándose de que sus propiedades ópticas de color son las adecuadas. Es un sistema que se implementaría dentro del control de calidad de la empresa Ariño Duglass.

Actualmente, Ariño Duglass ya cuenta con un espectrofotómetro en línea diseñado hace unos años por el GTF, y descrito en el proyecto final de carrera “Desarrollo de un amplificador síncrono de bajo coste para detección de señales ópticas mediante una tarjeta DSP” [1]. Dicho espectrofotómetro testea con gran precisión la calidad de los vidrios fabricados dentro de la planta de producción de Ariño Duglass, pero con un proceso de medida lento, de aproximadamente 2 minutos. Esto es debido a que utiliza una lámpara de xenón y un monocromador con red de difracción motorizada para seleccionar las distintas longitudes de onda. Además, las mediciones se realizan en un único punto, por lo que no da cuenta de inhomogeneidades a lo largo del proceso de fabricación.

El objetivo es complementar el espectrofotómetro actual con un nuevo espectrofotómetro que mida el color de las capas en reflexión y en transmisión en tiempo real y en 5 puntos diferentes del vidrio, cubriendo el rango del espectro visible. Esto permitirá identificar inhomogeneidades en el proceso de fabricación, tanto en tiempo como en posición. El sistema final por tanto comprenderá cinco módulos de medida. Dentro de este trabajo fin de máster se aborda la realización de uno de estos módulos de medida, el cual permitirá validar su diseño y asegurar las prestaciones del espectrofotómetro que posteriormente se implementará en la línea de producción de Ariño.

Para cumplir con los requisitos del sistema, en este trabajo fin de máster se ha abordado el diseño de la óptica, de la mecánica y de la electrónica del sistema, así como la programación de una aplicación de escritorio con la que mostrar al usuario los datos necesarios. Como novedad a trabajos previos realizados por el grupo GTF, dentro del proyecto se ha probado el uso de la plataforma Arduino, de sus módulos de comunicación RF para envío de señales de modulación y de la tecnología XBee para el envío de las medidas a un ordenador central. Todas estas tareas se detallan en el capítulo 3.

Finalmente, para la verificación de las prestaciones del sistema espectrofotómetro final, se han llevado a cabo pruebas de crosstalk entre canales, tiempos de medida, estabilidad de las medidas y comportamiento frente a ciclos de temperatura del módulo desarrollado. Estas pruebas y sus resultados se muestran en el capítulo 4.

Finalmente, en el capítulo 5 se recogen las conclusiones del trabajo realizado.

Capítulo 2

Estudio comparativo de Lock-in analógico y digital para señales ópticas bajas

2.1. Introducción

En las situaciones en que deben medirse señales con relaciones señal a ruido pequeñas, bien porque su amplitud es muy baja, o bien porque el ruido es alto, se hace necesario el uso de la detección síncrona Lock-in [2] [3] [4].

Un amplificador Lock-in genera una salida DC proporcional a la amplitud de la señal AC que se desea medir, aún incluso cuando las señales presentan una amplitud centenares de veces menor que la del ruido. Por lo tanto, se usa para detectar y medir señales AC muy pequeñas, de hasta nanovoltios, o para detectar señales en ambientes muy ruidosos.

Su funcionamiento se basa principalmente en un rectificador AC-DC especial, llamado *phase-sensitive detector* (PSD). En este caso, a diferencia de otros rectificadores donde no se distingue entre ruido y señal, el PSD únicamente rectifica la señal de una frecuencia muy concreta, obteniéndose a la salida un nivel DC proporcional a la amplitud de dicha señal, mientras que el resto de señales aparecen a la salida del amplificador Lock-in como una fluctuación AC. Esto quiere decir que con un simple filtro paso bajo a la salida de este rectificador, podemos obtener la señal DC deseada.

En la actualidad, el GTF ha estado desarrollando e implementando amplificadores Lock-in digitales y analógicos, cada uno de ellos con sus ventajas y sus inconvenientes. Sin embargo, dentro del grupo no se ha realizado un análisis específico del comportamiento de ambos Lock-in en condiciones de señales ópticas muy bajas para comparar sus prestaciones, y conocer cuál se comporta mejor en diferentes situaciones de cara a elegir uno u otro en función de las aplicaciones finales. Por este motivo, como primer punto en este TFM, se ha abordado el estudio experimental del comportamiento del Lock-in analógico y digital con señales bajas.

Para poder hacer una comparación real, los dos amplificadores Lock-in deben compartir sistema de detección, lo que obliga a diseñar una misma placa para ambos. También es necesaria otra segunda placa con la que generar la señal de emisión. Siguiendo esta idea, se ha diseñado el sistema esquematizado en la Figura 2.1.

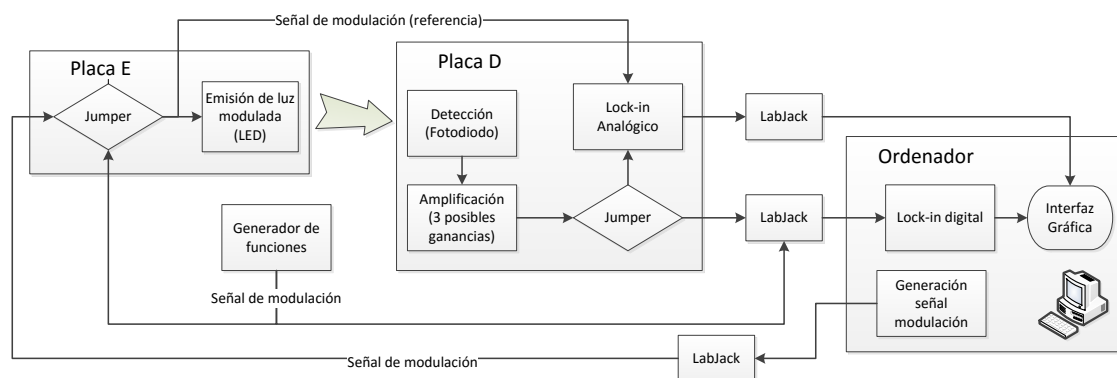


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema.

Este sistema cuenta con dos PCBs. Una primera placa E, actuando como fuente emisora de luz, y una segunda placa detectora, funcionando como receptora de esa señal. También se utiliza un ordenador para realizar la amplificación Lock-in digital y mostrar los resultados del analógico, y en caso de ser requerido, generar la señal con la que se modulará el diodo LED, aunque también es posible obtener dicha señal de modulación a través de un generador de funciones. Para seleccionar el método de generación de la señal, la placa emisora cuenta con dos conectores de entrada distintos, junto con un jumper encargado de elegir entre el generador de funciones o el ordenador. Un segundo jumper, colocado en la placa detectora permite seleccionar entre el amplificador Lock-in analógico y el digital. En el caso del analógico, el procesado se realiza en la propia placa detectora, mientras que el digital se procesa internamente en el ordenador.

2.2. Diseño de la electrónica

Como ya se ha comentado, son necesarias dos PCBs distintas, una para la emisión modulada de luz, y otra para su detección y la amplificación Lock-in analógica. Ambas placas son creación del autor, aunque su diseño está basado en uno anterior propiedad del GTF. El software utilizado ha sido la versión gratuita de *Eagle* [5].

2.2.1. Placa E (emisora)

Esta placa tiene la función de emitir luz modulada, aspecto imprescindible para realizar la amplificación Lock-in. Su componente principal es el diodo LED, el cual va acompañado de la electrónica necesaria para su correcta modulación. Esta placa también incluye dos conectores con el objetivo de posibilitar la introducción de la señal de modulación desde una LabJack o desde un generador de funciones. La LabJack [6] es una tarjeta de adquisición de datos conectada al ordenador mediante USB. En este proyecto se ha trabajado con el modelo U3-HV. Además, en caso de que se quiera realizar la amplificación Lock-in analógica, se ha añadido un conector con el que llevar la señal de modulación de la placa emisora hasta la placa detectora, y así poder realizar en ella la detección síncrona. El esquemático completo se puede apreciar en la Figura 2.2, o en mejor detalle en el Anexo D.

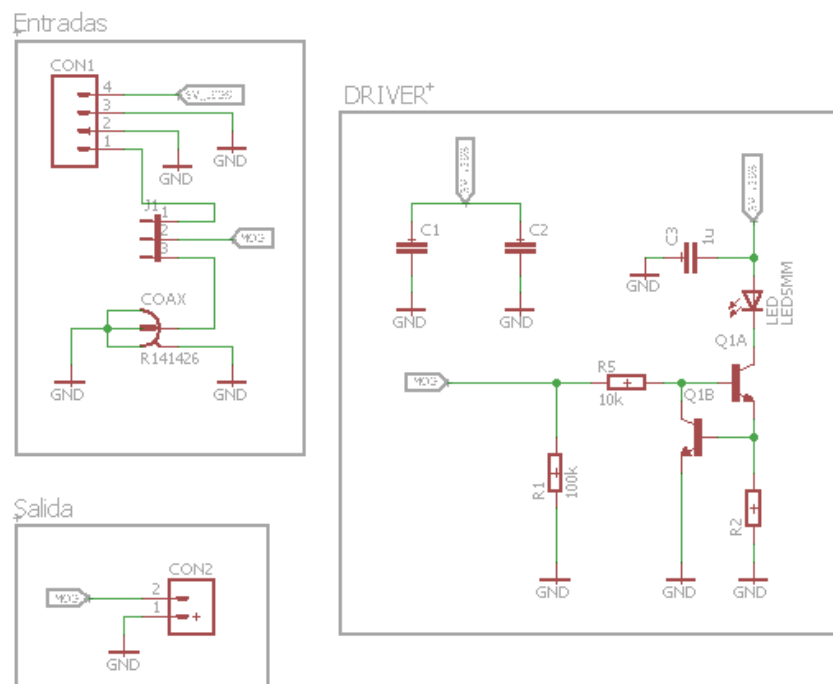


Figura 2.2. Esquemático de la placa emisora.

El bloque más importante de esta placa es el llamado *Driver*, ya que es el encargado de modular la emisión del diodo LED. En dicho bloque, la etiqueta “MOD” indica la señal de entrada que introduce la forma de onda con la que se va a modular el LED. Dicha señal, puede provenir indistintamente de un generador de funciones, o de un ordenador a través de una LabJack. Además, la forma de onda de entrada es indiferente (cuadrada o senoidal) ya que el circuito está diseñado para convertirla siempre en una señal cuadrada.

Para comprender el funcionamiento del *Driver*, hay que fijarse de nuevo en la Figura 2.2. En ella, la intensidad que pasa a través del LED y de la resistencia R2, es la misma. Además, sabiendo que la tensión base emisor del transistor utilizado, BCM847, es de 0,66V, aseguramos dicha caída de tensión en la resistencia R2. Por lo tanto, podremos elegir la intensidad que circulará por la resistencia R2 y en consecuencia por el diodo LED, seleccionando a conciencia el valor de R2.

Una vez fijada la intensidad que atraviesa el diodo, falta modular la emisión del LED. Esto se consigue con el transistor Q1A, el cual actúa como un interruptor. Además, debido al uso de transistores bipolares, es necesario colocar la resistencia R5 para convertir voltaje a intensidad.

Con esta configuración, y partiendo de lo explicado anteriormente, se comprueba que la intensidad que circula por el diodo LED está fijada por el valor de la resistencia R2 y, por lo tanto, es independiente tanto del tipo de modulación que haya a la entrada, como de su amplitud.

2.2.2. Placa D (detectora)

La segunda placa actúa como detectora de la señal emitida por la placa E. Además, integra el amplificador Lock-in analógico. Su esquemático se puede observar en la Figura 2.3. Al igual que ocurría con la placa emisora, su desarrollo es obra del autor, aunque basándose en un diseño anterior del grupo GTF. Los esquemáticos se pueden observar con más detalle en el Anexo D.

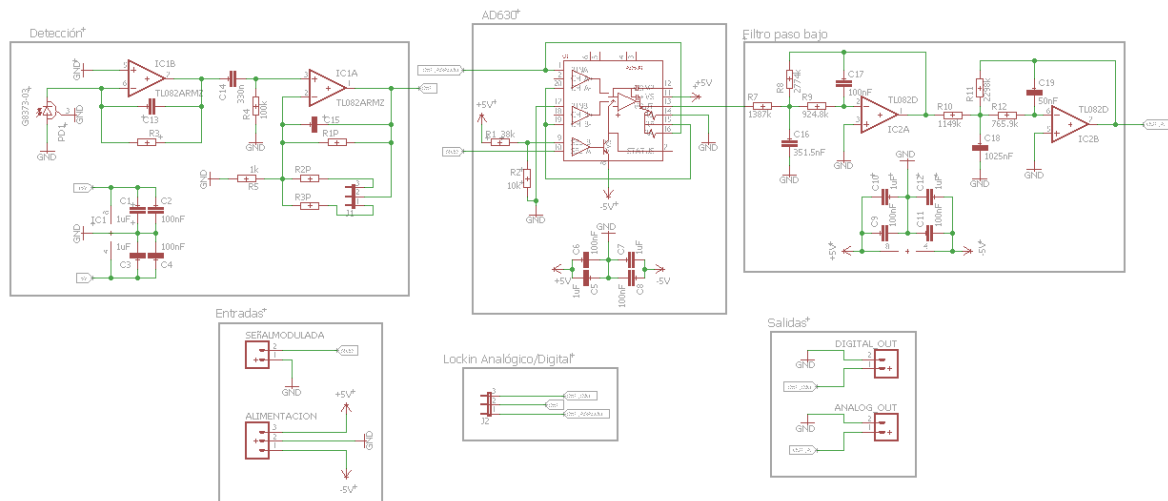


Figura 2.3. Esquemático de la placa receptora.

El primer bloque encargado de realizar la detección y amplificación de la señal recibida, es común a ambos tipos de amplificador Lock-in. En él se encuentra el fotodiodo de silicio S1336 de la marca Hamamatsu, seguido de dos etapas amplificadoras [7] necesarias debido a que la potencia de la señal recibida puede llegar a ser muy pequeña. Entre ambas etapas se ha colocado un filtro paso alto (C14 y R4) para eliminar la componente de continua.

Es importante remarcar que dentro de las etapas amplificadores, los condensadores C13 y C15 no se sueldan, por lo que se trata de una etapa amplificadora inversora, seguida de una etapa amplificadora no inversora. Ambos condensadores están incluidos en el esquemático porque en el caso de existir mucho ruido, soldar un condensador de un valor muy pequeño, en torno a los 10pF, puede limpiar la señal. Pero no es recomendable subir en exceso su valor ya que las dos etapas amplificadoras se convierten en etapas amplificadoras integradoras y transformarían la señal cuadrada detectada en una triangular.

Así como la primera etapa es de ganancia fija, la segunda etapa no lo es. El motivo está en la posibilidad de trabajar a diferentes rangos de señal óptica baja. En vez de utilizar un potenciómetro, se colocó el jumper J1 con el cuál se puede elegir entre 3 ganancias distintas. En

caso de no colocar el jumper, solamente actuará la resistencia R1P, y se obtendría una primera ganancia de 100. De estar colocado en la posición 2-3, se obtendría la segunda ganancia, de 10, determinada por el paralelo de R1P y R2P. Finalmente, si el jumper está en la posición 1-2, se obtendría la tercera ganancia, de 1, dependiente del paralelo de R1P y R3P.

Finalmente, la señal de salida de las etapas amplificadoras (“DET”) se puede guiar por dos caminos distintos dependiendo del amplificador Lock-in que se quiera utilizar. Un segundo jumper es el encargado de elegir entre digitalizar la señal y realizar la amplificación Lock-in digital en un ordenador, o bien, realizar la amplificación Lock-in analógica, tal y como se explica a continuación.

En caso de elegir la amplificación Lock-in analógica, la señal llega a los bloques del AD630 y del filtro paso bajo. El primer bloque, contiene el integrado AD630 de la marca *Analog Devices* (más información en el Anexo G), el cual se encarga de realizar la multiplicación entre la señal recibida “DET_ANALOG” y la señal de modulación de referencia “MOD” (la misma con la que se moduló la emisión del LED). Dicha señal “MOD” llega a esta placa detectora, a través de un cable conectado directamente a la placa E. Las conexiones realizadas entre los pines del AD630 están basadas en una proposición de su *datasheet* [8], con el objetivo de configurarlo adecuadamente para realizar la multiplicación de las señales. También se incluyen cuatro condensadores (C5, C6, C7 y C8) con los que filtrar la alimentación.

Una vez realizado el producto de las dos señales, la señal resultante contiene una componente continua dependiente de la amplitud de la señal deseada, junto con los productos de intermodulación. Por lo tanto, es necesario colocar un filtro paso bajo a la salida con el que eliminar todas las componentes frecuenciales indeseadas, quedándose únicamente con la componente de continua. El filtro implementado es de tipo *Butterworth* [9] de cuarto orden, con frecuencia de corte 0’53Hz, y compuesto por dos etapas de tipo *Multiple FeedBack* [10] [11].

En el caso de seleccionar la amplificación Lock-in digital, la señal de salida de la segunda etapa amplificadora (“DET”) se digitaliza haciendo uso de una LabJack U3-HV, y se envía al ordenador. A continuación, se realiza la amplificación Lock-in digital con el software explicado en el siguiente apartado.

2.3. Desarrollo software de medida

El amplificador Lock-in digital está implementado con el lenguaje de programación C#, dentro del entorno de desarrollo *VisualStudio* [12]. Para su correcto funcionamiento es necesario contar con una tarjeta de adquisición de datos LabJack, ya que hay que digitalizar la señal de salida de la segunda etapa de amplificación de la placa detectora. Además, en caso de haber generado la señal de modulación del diodo LED desde un generador de funciones, también es necesario digitalizar dicha señal de referencia para poder llevar a cabo el producto de señales dentro del ordenador.

La aplicación cuenta con una interfaz gráfica intuitiva (Figura 2.4) en la que se muestra el valor obtenido a la salida del amplificador Lock-in digital, junto con su error (A), así como una gráfica donde se ilustra la forma de onda de la señal (B). A la izquierda se puede ver un panel de

configuración, en el que se incluye la posibilidad de cambiar el filtro paso bajo utilizado (C), así como los filtros de enganche y del PLL (D). Por último, se ofrece la posibilidad de guardar en tiempo real los valores obtenidos (E). De esa forma, se podrá realizar un post-procesado o una evaluación del histórico de los datos adquiridos.

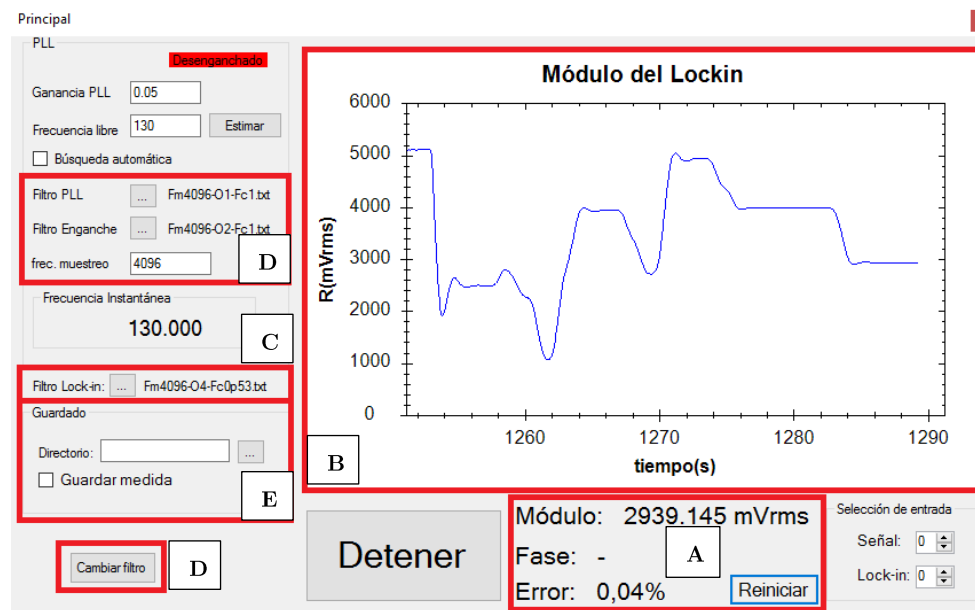


Figura 2.4. Interfaz gráfica del amplificador Lock-in digital.

Es importante destacar que esta aplicación ha sido desarrollada sobre la base de un software diseñado por el GTF para un amplificador Lock-in digital. Dentro del TFM, y buscando comparar con mayor exactitud ambos tipos de amplificador Lock-in, se han llevado a cabo modificaciones en el código con el objetivo de adaptar el software al amplificador Lock-in analógico. Gracias a ello, es posible digitalizar la salida de dicho amplificador, y mostrar sus datos en la pantalla anterior.

2.4. Montaje del sistema

Tras realizar el diseño de la electrónica, el siguiente paso consiste en el ruteo de las pistas. En la Figura 2.5(a) se puede observar la placa emisora, mientras que en la Figura 2.5(b) se puede observar la placa detectora. También se pueden ver en más detalle en el Anexo D. El conector tipo coaxial permite introducir la señal de modulación desde un generador de funciones. El tamaño de ambas placas está fijado por requisitos de diseño (se sitúan encima de una pieza rectangular de esas dimensiones).

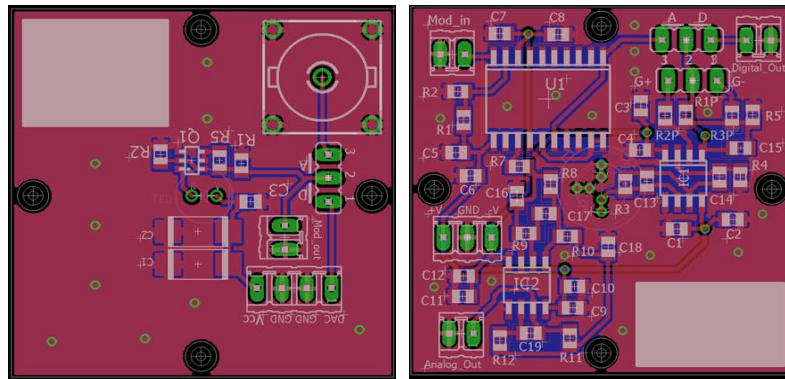


Figura 2.5. Diseño en Eagle de la placa PCB emisora (izq.) y detectora (drcha.).

Una vez soldados todos los componentes, el resultado es el que se puede apreciar en la Figura 2.6.

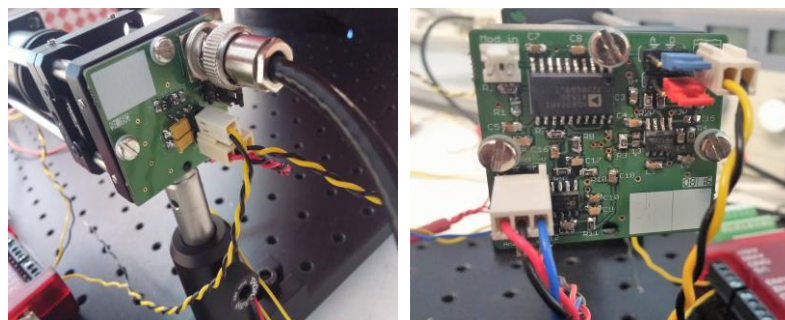


Figura 2.6. Resultado final de la placa emisora(izq.) y detectora (drcha.).

Con el objetivo de testear su funcionamiento, así como de realizar las medidas experimentales oportunas, se ensambló el montaje de la Figura 2.7. En él, ambas placas se encuentran enfrentadas (A, E), de tal forma que el haz de luz del diodo LED (B) tenga visión directa con el fotodiodo. Para modificar la amplitud de la señal recibida y verificar el comportamiento del sistema con señales de baja amplitud, se han incluido dos diafragmas (C, D). El segundo (D), está situado a la entrada del fotodiodo para limitar en la medida de lo posible la luz ambiente.

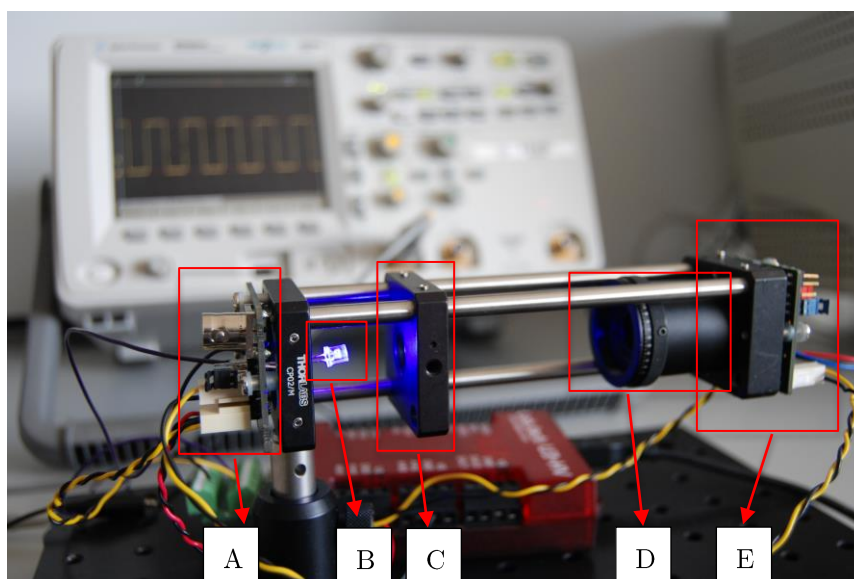


Figura 2.7. Montaje inicial para experimentación.

2.5. Medidas

En este apartado se explican las medidas realizadas haciendo uso del montaje de la Figura 2.7. Los valores de interés son tanto el valor a la salida del amplificador Lock-in, como su desviación, calculada a lo largo de un periodo concreto de tiempo, y que aporta información de su estabilidad. La fórmula utilizada para el cálculo de la desviación o error se indica en la ecuación (2.1).

$$\text{Desviación}(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=0}^N \left(\text{vector}(n) - \frac{\sum_{n=0}^N \text{vector}(n)}{N} \right)^2}{(N-1)}}}{\frac{\sum_{n=0}^N \text{vector}(n)}{N}} \quad (2.1)$$

Otro dato importante es la potencia recibida por el fotodiodo. En este proyecto se ha utilizado el fotodiodo de silicio, S1336, de la marca Hamamatsu (Anexo G). Fijándose en la Figura 2.8, y teniendo en cuenta que el diodo LED emite en la longitud de onda de 400nm, la responsividad del fotodiodo es de 0'18A/W.

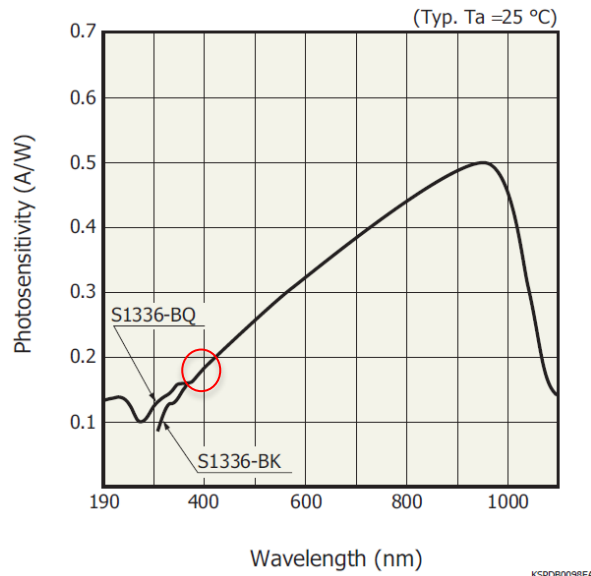


Figura 2.8. Respuesta espectral del fotodiodo S1336.
Obtenida del datasheet del fabricante, Hamamatsu.

Una vez conocida la responsividad en la longitud de onda deseada (0'18A/W), se puede calcular la potencia recibida en el fotodiodo mediante la medición del voltaje a la salida de la segunda etapa de amplificación. Para ello, hay que tener en cuenta que la primera etapa tiene una resistencia de 3'3MΩ en la realimentación negativa, y que la segunda etapa tiene una ganancia 100, por lo que la potencia recibida en el fotodiodo será el resultado de aplicar la ecuación (2.2).

$$\text{Potencia recibida (W)} = \frac{\frac{\text{Salida 2}^{\text{a}} \text{ etapa (V)}}{\text{Ganancia 2}^{\text{a}} \text{ etapa (adimens.)}}}{\text{Resistencia 1}^{\text{a}} \text{ Etapa}(\Omega) * \text{Responsividad (A/W)}} \quad (2.2)$$

2.5.1. Comparación digital-analógico

Gracias al sistema creado, la comparación entre el amplificador Lock-in digital y el analógico es bastante sencilla, limitándose únicamente a modificar la posición de un jumper. Como elementos adicionales, hay que tener en cuenta que es necesario introducir una señal de modulación con la que modular el LED y realizar la detección síncrona. Esto se puede llevar a cabo mediante el ordenador y una LabJack, o a través de un generador de funciones. Para este experimento se utilizó el modelo 81150A de la marca *Agilent* (actualmente *Keysight*) [13]. Para la captura y procesado de los datos se utiliza una LabJack U3-HV muestreando a 4096 muestras por segundo y el software comentado en el apartado 2.3.

En la Figura 2.9 se muestran los datos adquiridos con los dos tipos de amplificador Lock-in. La frecuencia de corte utilizada en los filtros paso bajo de salida es la misma, 0'53Hz. Se observa que ambos amplificadores presentan un comportamiento muy similar con señales mayores de 2nW, consiguiendo desviaciones menores o iguales al 0'1%. En cambio, cuando las señales son muy bajas, por debajo de los 2nW, el amplificador Lock-in analógico ofrece un mejor comportamiento que el digital. En el peor caso, con 0'5nW en detección, la desviación medida con el amplificador Lock-in analógico es de 0'5%, frente al 1% del amplificador Lock-in digital.

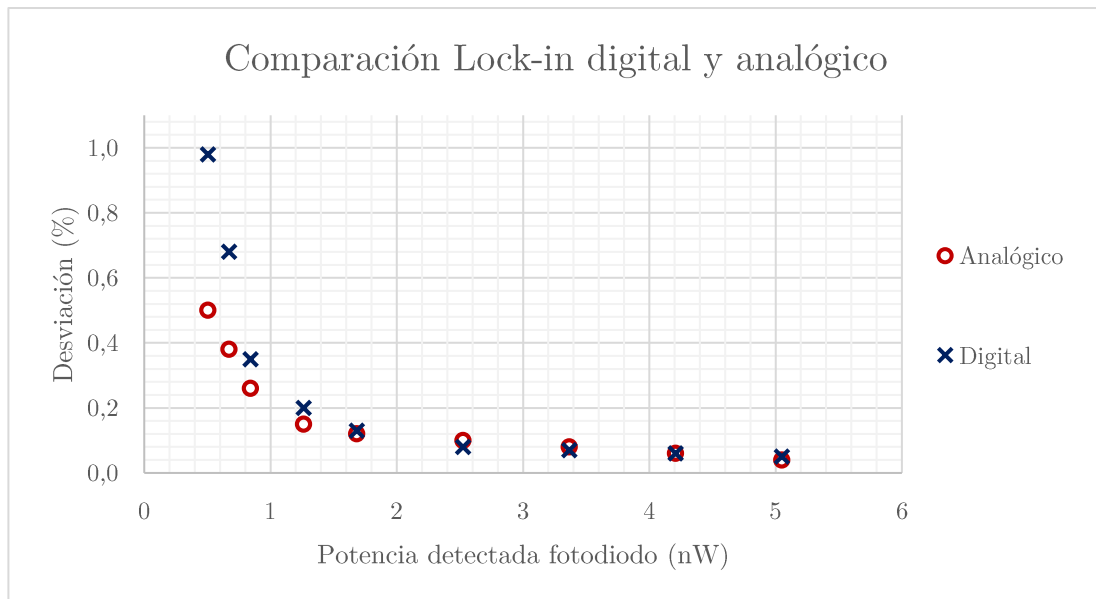


Figura 2.9. Comparación del amplificador Lock-in analógico con el digital.

2.5.2. Comparación entre filtros Lock-in digital

Una vez visto que el amplificador Lock-in analógico se comporta algo mejor que el amplificador Lock-in digital, se realiza una nueva comparación con el objetivo de saber si se pueden mejorar las prestaciones del digital. Para ello, se va a variar la frecuencia de corte del filtro paso bajo de la salida, ya que dicho parámetro afecta a su precisión, aunque es importante recordar que también repercute en su tiempo de respuesta, el cual es inversamente proporcional al producto de 2π por la frecuencia de corte. De ese modo, una frecuencia de corte pequeña filtra mayor cantidad de ruido que un filtro de frecuencia de corte grande, pero supone un tiempo de respuesta mayor.

En la Tabla 2.1 se muestran 4 frecuencias de corte distintas, y los tiempos de respuesta de cada uno de ellos.

Frecuencia de Corte (Hz)	τ (s)	5τ (s)
0'159	1'001	5'005
0'530	0'300	1'501
1'590	0'100	0'500
5'300	0'030	0'150

Tabla 2.1. Frecuencia de corte y tiempo de respuesta de los 4 filtros testados.

Los resultados obtenidos con las frecuencias de corte de la Tabla 2.1, pueden observarse en la Figura 2.10. En ella, se han comparado filtros digitales tipo *Butterworth* de orden 4. Su comportamiento es muy similar, apreciándose únicamente algunas diferencias para valores menores de 4nW , pero que se pueden considerar pequeñas ya que en todo caso las diferencias entre las desviaciones de los filtros, son menores del 0'2%.

La razón de este resultado se encuentra en las condiciones en las que se ha realizado el experimento, ya que únicamente afecta el ruido eléctrico. En el caso de que al fotodiodo le llegara luz ambiente (quitando el diafragma), la anchura del filtro sí que sería relevante.

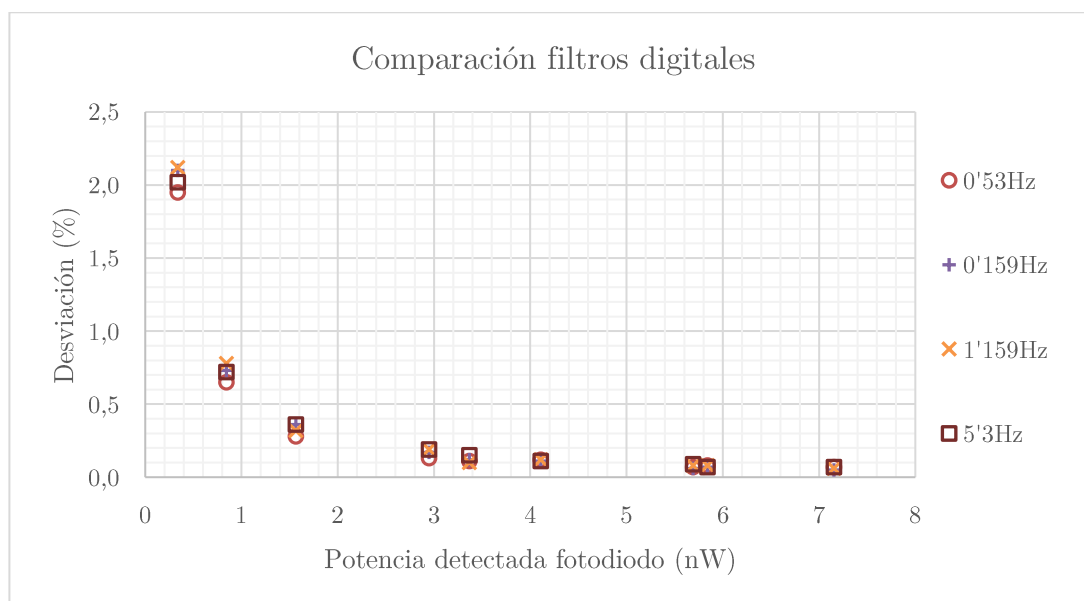


Figura 2.10. Comparación del amplificador Lock-in digital variando la frecuencia de corte.

Capítulo 3

Desarrollo de módulos de medida de color

3.1. Introducción

En la línea de producción de Ariño Duglass, el disponer de un sistema de medida del color de las capas depositadas sobre el vidrio en tiempo real es fundamental dentro del proceso de control de calidad de la producción. Actualmente no se dispone de un sistema de estas características, y por ello se hace necesario el diseño y fabricación de un sistema de medida que permita:

- Medir el color de las capas en transmisión y reflexión.
- Obtener medidas en tiempo real.
- Tener un error en la medida menor del 1%.
- Que la medida pueda hacerse en 5 puntos diferentes del vidrio al mismo tiempo.

Para ello, se ha diseñado por parte del GTF el sistema mostrado en la Figura 3.1, el cual consta de 5 módulos, cada uno de ellos compuesto por dos bloques, uno de reflexión y otro de transmisión. En total, 5 bloques de transmisión y 5 bloques de reflexión, enfrentados directamente, y con el vidrio equidistante a ambos. Cada bloque de reflexión (situado debajo del vidrio) consta

de 6 LEDs, y 12 fotodiodos de Si cada uno con su respectivo amplificador Lock-in (6 para medir la referencia y 6 para medir la reflexión), mientras que cada bloque de transmisión (encima del vidrio), consta de 6 fotodiodos de Si y sus correspondientes amplificadores Lock-in.

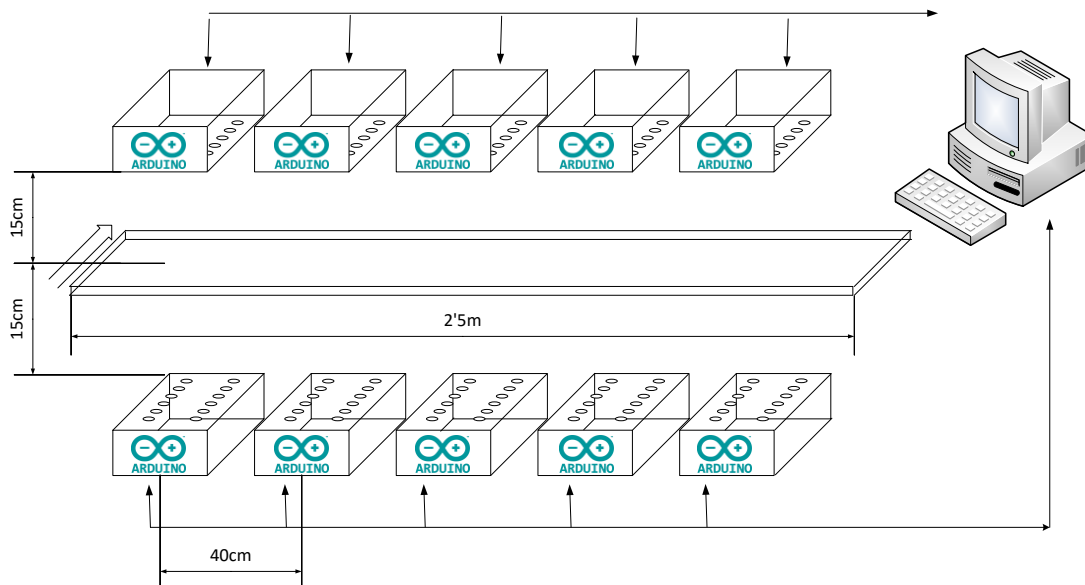


Figura 3.1. Esquema del sistema espectrofotómetro.

En él se observan los 5 módulos, con un vidrio equidistante a sus bloques, y un ordenador en el que mostrar los resultados.

3.2. Consideraciones previas al diseño del sistema

Para abordar el diseño del sistema en óptimas condiciones, es necesario llevar a cabo un estudio previo de las distintas problemáticas potencialmente existentes, así como conocer o plantear sus posibles soluciones.

3.2.1. Derivas

El uso de diodos LED puede suponer una deriva en los valores medidos a lo largo del tiempo. Esto se debe al propio calentamiento del diodo y a la variación en la forma del haz de emisión a lo largo del tiempo. Para compensar estos cambios, se incluye un canal de referencia en el sistema. Con él, se pretende realizar el cociente entre los valores obtenidos en reflexión o en transmisión, frente a los de referencia, y de esta forma compensar las variaciones en la emisión del LED.

3.2.2. Procesado de múltiples amplificadores Lock-in

Para ser más precisos en la medida de color, en cada bloque se decidió utilizar 6 diodos LED, cada uno de ellos con una longitud de onda concreta de tal forma que se abarque lo mejor posible el espectro visible (380nm - 750nm). Por lo tanto, el bloque de reflexión, contará con un total de 12 amplificadores Lock-in, 6 de referencia y 6 de reflexión. Mientras que el bloque de transmisión

tendrá solamente los 6 canales de transmisión. Eso hace que un módulo, el cual consta de un bloque de reflexión, y uno de transmisión, tenga un total de 18 amplificadores Lock-in. En definitiva, el espectrofotómetro está compuesto por 5 módulos, y cuenta con un total de 90 amplificadores Lock-in.

Esto supone un gran problema ya que en el caso de implementar amplificadores Lock-in digitales, es necesario en primer lugar, contar con 90 conversores analógico-digitales para digitalizar la señal detectada por el fotodiodo, y a continuación, procesar simultáneamente 90 amplificadores Lock-in digitales, con la elevada carga computacional que eso supone. En cambio, en el caso de implementar amplificadores Lock-in analógicos, el problema se reduce a digitalizar las 90 salidas, con el objetivo de mostrar los resultados al usuario de una forma más visual. La carga computacional es mucho menor, pero a cambio, se complica en gran medida el diseño de la electrónica.

Teniendo en cuenta la comparación realizada en el capítulo II, en el que se demostró que el amplificador Lock-in analógico arroja resultados ligeramente mejores que el digital en el caso de señales bajas, y teniendo en cuenta el problema que supone procesar simultáneamente 90 amplificadores Lock-in digitales en un ordenador, se decidió implementar amplificadores Lock-in analógicos en el sistema final.

En cuanto al problema de digitalizar las salidas de los 90 Lock-in, se pensó en utilizar una tarjeta de adquisición de datos LabJack U3 [6], la cual cuenta con 16 I/O flexibles, y 4 I/O dedicadas, o lo que es lo mismo, hasta un máximo de 16 entradas analógicas, o 20 entradas/salidas digitales. Una posible solución consistía en implementar una topología en la que hubiera una LabJack por cada módulo y mediante un multiplexor, adquirir las 18 salidas de los Lock-in, con las 16 entradas analógicas disponibles. El inconveniente es que harían falta 5 LabJack, lo que supone un precio elevado. Otra posibilidad, consistiría en usar una única LabJack para todos los módulos, y diseñar alguna red de multiplexado para convertir las 90 salidas analógicas en las 16 que admite la tarjeta. Pero esta opción se descartó porque usar una única LabJack como sumidero de 90 datos no es lo más adecuado en una aplicación en la que se está buscando que la adquisición de las medidas sea lo más rápida posible.

Como alternativa a la LabJack, se planteó usar placas Arduino [14] debido a su sencillez de uso, la gran cantidad de posibilidades que ofrece, y a su reducido precio. Dentro de Arduino, se barajaron dos modelos distintos, por un lado, el Arduino MEGA (16 entradas analógicas) y, por otro lado, el modelo Arduino UNO (6 entradas analógicas). Finalmente, se optó por el Arduino UNO, ya que es más económico y, sobre todo, más pequeño. El problema del número de entradas analógicas se resuelve con multiplexores.

Finalmente se decidió usar una placa Arduino UNO por cada bloque (Figura 3.1), cada uno de ellos adquiriendo, o bien 12, o bien 6 datos analógicos, y enviándolos al ordenador para mostrarlos en pantalla al usuario.

3.2.3. Adquisición de múltiples señales

En el caso del bloque de reflexión, se han de medir 12 salidas analógicas (6 de referencia y 6 de reflexión), por lo que para poder realizarlas con el Arduino UNO, el cual cuenta con 6 entradas analógicas, se usan dos integrados ADG409, cada uno de los cuales contiene dos multiplexores de tipología 4:1. Es decir, se usan en total 4 multiplexores 4:1, consiguiendo un equivalente de 16:4. Hay que tener en cuenta que para configurar y controlar los multiplexores hace falta usar 2 salidas digitales del Arduino, pero esto no supone ningún problema ya que se cuenta con un total de 14 pines digitales, número suficiente para llevar a cabo todas las tareas requeridas.

3.2.4. Crosstalk

Dentro del bloque de reflexión se incluyen 6 diodos LED, cada uno de ellos emitiendo en una longitud de onda distinta. Todos estos haces de luz apuntan a un vidrio situado a 15cm de distancia, donde una parte del haz es reflejada y vuelve al bloque de reflexión, mientras que otra parte atraviesa el vidrio, y llega hasta el bloque de transmisión, situado a otros 15cm del vidrio. En total, el haz de luz recorre siempre 30cm de distancia, longitud suficiente como para que el haz se ensanche y provoque *crosstalk* entre canales. Más aún si tenemos en cuenta que entre los diodos LED existe una separación de únicamente 3cm.

Para evitar estos posibles problemas de *crosstalk*, se decidió tomar las siguientes consideraciones de diseño:

- Diseño mecánico y de guiado óptico: Creación de canales en el bloque de plástico con el objetivo de confinar el haz, tal y como se describe en el Anexo C.
- Diseño electrónico de detección: Uso de 2 modulaciones distintas, de tal forma que LEDs contiguos no sean modulados con la misma frecuencia.

3.3. Pruebas de validación de Arduino

Antes de pasar al diseño de la electrónica y de la mecánica del sistema, se realizaron unas pruebas preliminares para asegurar que la elección del Arduino UNO es viable con los requisitos del sistema. Esto viene motivado porque dentro del GTF, aunque se conocía la placa Arduino, hasta la fecha no se había implementado en ningún proyecto. Por lo tanto, se quiso probar antes su funcionamiento, y asegurarse de que era una opción viable para el sistema final.

Con ese objetivo, se preparó un pequeño montaje que permitiera testear el funcionamiento del sistema. Las placas que se utilizaron para la emisión de luz y para la amplificación Lock-in son las placas diseñadas en el capítulo 2, aunque en esta ocasión ya no están enfrentadas directamente entre sí, sino que se colocan de tal forma que el haz de luz llegue al receptor mediante reflexión en un vidrio situado a 15cm de distancia. De este modo, se simula la situación final del espectrofotómetro. A continuación, se detallan las distintas pruebas realizadas.

3.3.1. Generación de 2 señales de modulación con Arduino

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.2.4, si se quiere evitar la aparición de *crosstalk*, es necesario generar al menos 2 frecuencias distintas con las que modular los diodos LEDs.

A primera vista, la función `Tone()` [15], proporcionada por Arduino puede parecer idónea, ya que genera un tono de la frecuencia y duración introducidas como parámetro. Sin embargo, esta función no es capaz de generar simultáneamente dos tonos de distinta frecuencia. La única forma de conseguirlo es haciendo uso de 2 de los 3 *Timers* con los que cuenta el microcontrolador ATmega328P de la placa Arduino UNO [16] [17] [18] [19] [20].

Configurando adecuadamente los *Timers* se pueden generar señales cuadradas entre 0V y 5V de amplitud y de la frecuencia deseada. A modo de ejemplo, la Figura 3.2 muestra el código de configuración del *Timer 1*. Sus dos variables más importantes son, bit1 (A) y TCNT1 (B). La primera de ellas, varía su estado entre 0V y 5V cada vez que salta la interrupción asociada al *Timer*. Dicha interrupción ocurre cuando el contador alcanza su valor máximo y sufre *overflow*. En el caso del *Timer 1* (16 bits), está fijado en el número 65536. La segunda variable, TCNT1, establece el valor de inicio del contador. Por lo tanto, cuanto mayor sea esta variable, más rápido se alcanzará el valor límite, y más rápido saltará la interrupción. Eso supone que el periodo de la señal cuadrada será menor, o lo que es lo mismo, la frecuencia de la señal será mayor.

En el caso del *Timer 2*, su configuración es prácticamente idéntica al *Timer 1*. Las únicas diferencias se encuentran en el tamaño de sus contadores (16 bits en el *Timer 1*, y 8 bits en el *Timer 2*), y en los pre-escaladores que utilizan. Si se quiere conocer más acerca de los *Timers*, se puede consultar el manual del microcontrolador ATmega328P [16].

```
volatile int bit1 = 0;

void setup() {
  pinMode(7, OUTPUT);

  noInterrupts();           // Desactiva todas las interrupciones
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 30000;           B // Valor desde el que empieza a contar.
                           // Entre 0 y 65536, ya que el Timer1 es de 16 bits.
  TCCR1B |= (1 << CS11);   // Selecciona el prescaler
  TIMSK1 |= (1 << TOIE1);  // Habilita la interrupción de overflow del Timer
  interrupts();           // Activa todas las interrupciones
}

ISR(TIMER1_OVF_vect)
{
  bit1 = bit1 ^ 1;       A
  digitalWrite(7, bit1);

  TCNT1 = 30000;
}
```

Figura 3.2. Código implementado en Arduino para configurar el *Timer 1*.

3.3.2. Precisión de las frecuencias generadas con Arduino

Una vez conseguido el objetivo de configurar ambos *Timers* correctamente, se probó a generar una misma señal de modulación de 209Hz, desde dos Arduinos distintos. Pero este experimento no fue satisfactorio porque nunca se conseguía generar exactamente la misma frecuencia desde los dos Arduinos. La razón está en que los relojes internos de cada placa no son los mismos, sino que sufren pequeñas variaciones entre ellos.

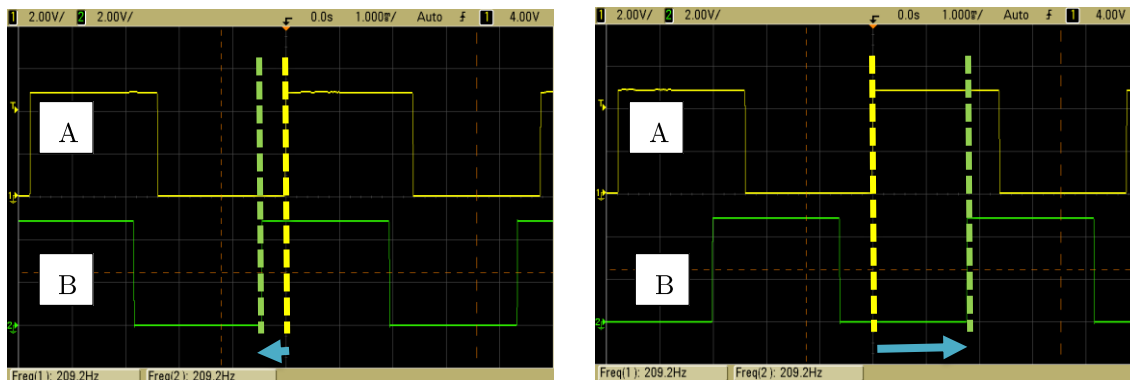


Figura 3.3. Señales cuadradas de la misma frecuencia, generadas por dos Arduinos distintos.

A la izquierda, ambas señales en un instante de tiempo determinado t . A la derecha, en un instante de tiempo $t+20s$.

En la Figura 3.3 se puede apreciar el problema comentado. La señal amarilla (A), está generada por el primero de los dos Arduinos y dispara el *Trigger*, mientras que la señal verde (B), está generada por el segundo Arduino. Ambas señales son aparentemente de la misma frecuencia, y así lo indica el osciloscopio en la parte inferior. Pero al cabo de 20 segundos se aprecia como la forma de onda B se va desplazando respecto de la A, pasando de tener un desfase entre señales de $-0,5ms$ en la imagen de la izquierda, a un desfase de $+1,8ms$ en la de la derecha. Esto demuestra que las frecuencias de ambos Arduinos, no llegan a ser exactamente iguales y se tiene una deriva que hace inviable esta solución para la implementación del Lock-in analógico.

Concretamente, en caso de haber implementado un amplificador Lock-in con detección de fase y cuadratura, es decir, con dos PSD, el desfase entre las dos señales no tendría mayor importancia, y se podría medir la amplitud de la señal sin ningún problema. Pero en nuestro caso, por sencillez, se implementa un amplificador Lock-in con un solo PSD. Eso quiere decir que en el momento en que ambas señales estén en fase, a la salida del Lock-in habrá un máximo de señal, mientras que cuando se encuentren en contrafase, habrá un mínimo. En definitiva, la salida del amplificador Lock-in no solo dependerá de la amplitud de la señal, sino que también variará en función del desfase, lo que invalida completamente el resultado.

La conclusión de todo esto es que solo se puede usar un Arduino como generador de la señal de modulación, lo que obliga a comunicar de alguna forma los dos Arduinos de los dos bloques que conforman un módulo.

3.3.3. Comunicación radiofrecuencia entre Arduinos.

Partiendo de la limitación del apartado anterior, a pesar de que dentro de un mismo módulo hay dos Arduinos, uno por cada bloque, únicamente uno de ellos puede actuar como generador de las dos señales de modulación (se generan dos distintas con el objetivo de minimizar el *crosstalk* entre canales). Estableciendo el Arduino del bloque de medida de referencia y de reflexión como generador, es necesario hacer llegar dichas señales hasta el bloque de medición de transmisión.

La solución más rápida y sencilla consiste en comunicar ambos bloques mediante cables. Otra alternativa se basa en compartir la señal de forma inalámbrica, haciendo uso de dos módulos de radiofrecuencia, uno por cada señal de modulación, y que transmiten en 315MHz y 433MHz. Ambas frecuencias se encuentran dentro de las bandas de uso libre.

En esta solución inalámbrica mostrada en la Figura.3.4, un Arduino actuaría como emisor (F), generando las dos señales de modulación y enviándolas mediante radiofrecuencia (A y B) a los bloques receptores (C y E) y que llegarían al Arduino receptor (G). En la figura se puede visualizar en la pantalla del osciloscopio las señales de modulación transmitidas. Hay que tener en cuenta que la transmisión inalámbrica lleva asociada un retardo entre la señal transmitida y la recibida. Si el retardo es pequeño y constante, los valores a la salida del amplificador Lock-in serán los adecuados. En caso contrario, podrían existir fluctuaciones en las medidas.

Tras guardar un histórico de los datos durante 24 horas, se comprobó que existía un pequeño retardo pero que era constante en todo momento. Por lo tanto, la salida del Lock-in a pesar de no ser la máxima posible, sí que dependerá únicamente de la amplitud de la señal que se desea medir.

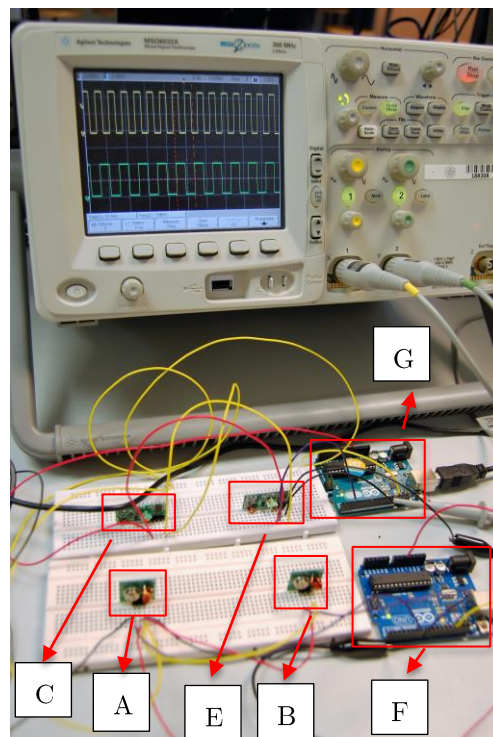


Figura 3.4. Montaje de experimentación de la comunicación RF.

3.3.4. Comunicación XBee Arduino-PC.

Otra ventaja de Arduino es que además de comunicarse vía USB con el ordenador, también puede hacerlo de forma inalámbrica usando los *shields* adecuados. En concreto, se pensó en la utilización de ZigBee [21] debido a su bajo coste y a su bajo consumo eléctrico.

En el proyecto se ha planteado una red XBee sencilla, formada por un Coordinador conectado al PC y 2 dispositivos sensores (*End Devices*) conectados cada uno a una placa B de medida de los módulos de medida, siendo escalable en topología de anillo hasta los 10 módulos de medida necesarios en el sistema espectrofotómetro final. En la Figura 3.5 se observa una prueba realizada con 2 *End Devices*(A), y un Coordinador(B). Como hardware, se utilizan placas Arduino Uno y sobre éstas se montan los módulos XBee S2, del fabricante Libellium (Arduino XBee v1.1) y del fabricante funduino (*XBee Shield*) disponibles en el mercado. La configuración de los módulos XBee se ha realizado con el software gratuito XCTU, que permite conectar y configurar varios módulos al mismo tiempo. Señalar que para posibilitar la conexión de los módulos con XCTU es necesario que el módulo de Arduino no genere señales por el puerto serie, por lo que conviene bien usar la placa Arduino sin el microcontrolador ATmega328P (Atmel) o bien que tenga cargado un programa que no genere salida de señales por el puerto.

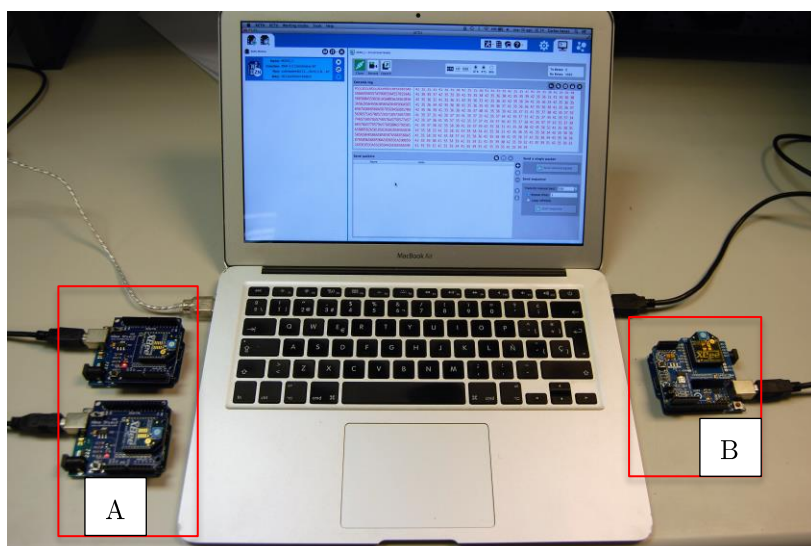


Figura 3.5. Pruebas realizadas con XBee.
El sistema consta de 2 *End Devices*(A) y un Coordinador(B).

Tras diferentes pruebas, la configuración final de los módulos XBee es la siguiente:

- para el Coordinador: XB24-B, función ZNET 2.5 Coordinador AT, Firmware versión 1047. Jumper XBee/USB en posición USB. Placa de Arduino sin el microcontrolador.

- para los dispositivos sensores: XB24-B, función ZNET 2.5 Router/End Device AT, Firmware versión 1247. Jumper XBee/USB en posición XBee. Placa de Arduino con el microcontrolador y cargado el programa de Arduino para envío de datos con la función `Serial.print('XX')` y que permanece a la escucha de comandos con la función `if (Serial.available() > 0) {recepcion = Serial.read();}`.

Finalmente se ha optado por una configuración ZNET 2.5 ya que permite al módulo Coordinador recibir los datos de cada dispositivo sensor y enviarlos al PC en tiempo real, y al mismo tiempo permite desde el PC poder enviar, a través del módulo Coordinador, comandos a los diferentes dispositivos sensores conectados, todo ello sin pérdida de datos ni variaciones de orden temporal en la emisión/recepción de los mismos. Señalar que estas mismas funcionalidades se intentaron inicialmente conseguir para una configuración de los módulos XBee en función de ZigBee, sin éxito, pues los comandos enviados desde el Coordinador producían retrasos y variaciones en el orden de recepción de los datos enviados desde los dispositivos sensores.

3.4. Diseño del sistema

Una vez llevados a cabo algunos experimentos con Arduino y comprobar que se podía realizar el proyecto usando esta tecnología, se procedió a diseñar el espectrofotómetro (hasta ahora se habían realizado los experimentos basándose en el montaje del Capítulo 2).

El proceso seguido para el desarrollo del espectrofotómetro se puede dividir en los siguientes apartados:

- Diseño de la mecánica, incluyendo las piezas mecanizadas en material plástico que componen cada uno de los bloques, así como la plataforma en la que se sustentan.
- Diseño de la electrónica, abarcando todo lo relacionado con las PCB de cada bloque.
- Diseño del software, en el cual se ha creado una aplicación de escritorio capaz de comunicarse con los módulos, y mostrar los datos relevantes al usuario a través de una interfaz gráfica. Además, se incluyen los scripts necesarios para programar las placas Arduino.

Los tres apartados están interconectados y dependen unos de otros, ya que, por ejemplo, las dimensiones del bloque de plástico afectan al tamaño y diseño de las PCBs, así como la configuración de los pines del Arduino dependen del ruteado de las pistas de la PCB y viceversa. Esto obliga a tener siempre en mente una visión global del producto final y a realizar los distintos procesos de forma paralela.

3.4.1. Diseño de la mecánica

Para llevar a cabo esta tarea, se ha utilizado el programa *SolidWorks* [22], un software de diseño CAD en 3D que permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Con él se han diseñado las dos piezas macizas de plástico que van servir para albergar las placas PCBs. Sus dimensiones son 150x50x180mm, y los planos se pueden encontrar en el Anexo C.

Con estos bloques se realiza el guiado del haz de luz del diodo LED, buscando reducir al máximo la luz ambiente que llega a los fotodiodos. Para ello, se perforan 18 canales en el plástico

(6 para los LEDs, y 12 para los fotodiodos). Su ubicación y su ángulo de entrada están calculados teniendo en cuenta la distancia de los bloques al vidrio, tal y como se puede observar en la Figura 3.6.

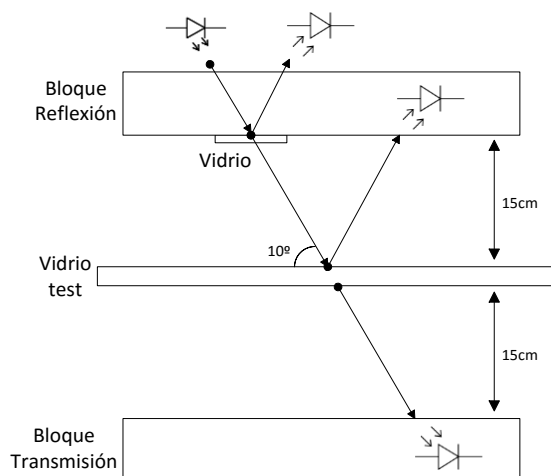


Figura 3.6. Esquema del diseño de los bloques

El diodo LED se sitúa arriba a la izquierda. A su lado el fotodiodo de referencia, y más a la derecha el de reflexión. Un pequeño vidrio colocado a la salida del canal del LED sirve para reflejar el 8% de la luz emitida por el diodo. De esta forma, el fotodiodo de referencia capta una pequeña porción del haz, mientras que el resto continúa hasta llegar al vidrio que se quiere testear. En dicho vidrio habrá una parte que se refleje y llegue al fotodiodo de reflexión (arriba a la derecha), mientras que el resto llegará al fotodiodo de transmisión (abajo a la derecha). El porcentaje de haz de luz que es reflejado, o transmitido, depende de las características del vidrio testado.

El diámetro y la longitud de los canales perforados está pensado para que lleguen únicamente los rayos deseados, aunque la proximidad entre los 6 LEDs, apenas 3cm de separación entre ellos, no garantiza la inexistencia de *crossstalk* entre canales. Por ello, se decidió utilizar 2 frecuencias de modulación distintas. Señalar que debido al guiado de la luz que se produce en los canales de salida de los haces de los LED, se observó que el tamaño final del haz sobre los detectores era mayor del esperado inicialmente, lo que daba lugar a un problema de *crossstalk* óptico entre canales. Esta problemática y su solución se detallan en el Anexo B. Finalmente, se hace un lapreado [23] de los diodos LED buscando homogeneizar su diagrama de emisión.

3.4.2. Diseño de la electrónica

El principal problema de este apartado se encuentra en el espacio, ya que existe una limitación provocada por las dimensiones de la caja donde se introduce el bloque de plástico. Esto unido al tamaño de alguno de los componentes, como por ejemplo el Arduino y su *shield* de XBee, o a la gran cantidad de los mismos (hasta 12 Lock-in en un solo bloque), complica el diseño de las PCBs, y obliga a pensar en alguna alternativa que resuelva los problemas de espacio.

La solución planteada (Figura 3.7) consiste en diseñar dos placas distintas. La llamada placa A, replicada seis veces, una por cada canal, y la placa B. La primera de ellas contiene dos amplificadores Lock-in, además del LED de emisión, mientras que la segunda alberga la placa Arduino, el *shield* de XBee, los módulos RF, y los multiplexores.

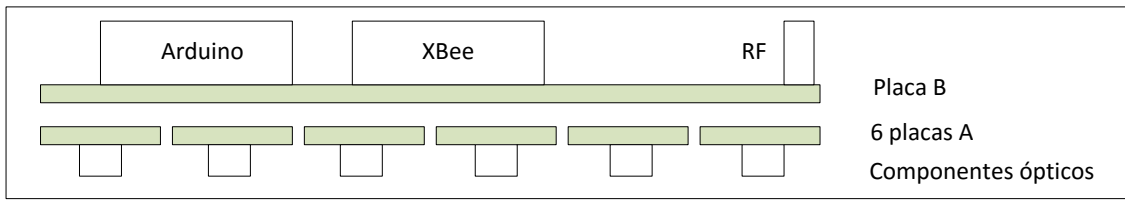


Figura 3.7. Esquema de montaje de las placas.

El motivo principal por el que se ha decidido fabricar 6 placas A por cada bloque, es que rutear 12 amplificadores Lock-in, junto a los 6 LEDs de emisión y sus drivers, es bastante complicado dentro de una única placa. Habiendo 6 canales, todos ellos con los mismos componentes, se hace más sencillo y más rápido, diseñar una sola placa, y después replicarla. Además, en el caso de fallos, su testeo y reparación, o en el peor de los casos, su sustitución es mucho más fácil.

Por otro lado, aunque al principio se pensó en diferenciar las placas de los bloques de medición de referencia y reflexión, frente a los de transmisión, finalmente se decidió que fueran las mismas, ya que la única diferencia existente entre ellos es que el primero usa 2 Lock-in, mientras que el segundo, sólo usa uno. Por lo tanto, soldando únicamente aquellos componentes que se requieran y dejando vacíos los *pads* restantes, se puede aprovechar el mismo diseño para ambos bloques.

La placa B se encarga de unificar y controlar las 6 placas A, así como de alimentarlas. Para ello, el Arduino genera la señal de modulación y la transmite a las placas A, controla los multiplexores, y captura el valor de amplitud de cada Lock-in.

Para el diseño de las placas, nuevamente se ha hecho uso del software libre *Eagle* [5], y se ha vuelto a partir del esquemático cedido por el grupo GTF, aunque en esta ocasión se han quitado los componentes innecesarios, a la par que se han añadido nuevos.

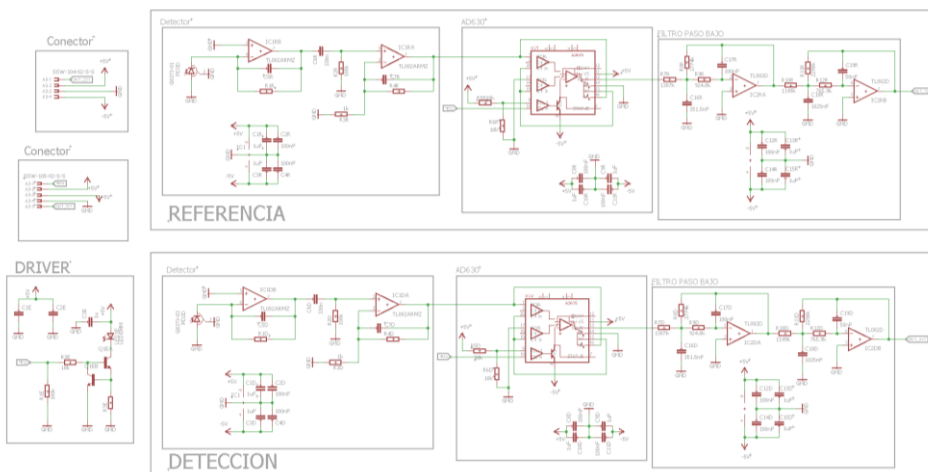


Figura 3.8. Esquemático de la placa A.
 Incluye el LED y 2 amplificadores Lock-in analógicos

En la Figura 3.8 se puede observar el esquemático de la placa que alberga el diodo LED y los dos Lock-in analógicos, mientras que en la Figura 3.9 se puede ver la PCB. Hay dos conectores situados en los dos extremos, que sirven tanto para compartir señales entre esta PCB y la que se sitúa encima, como para servir de sujeción y soporte.

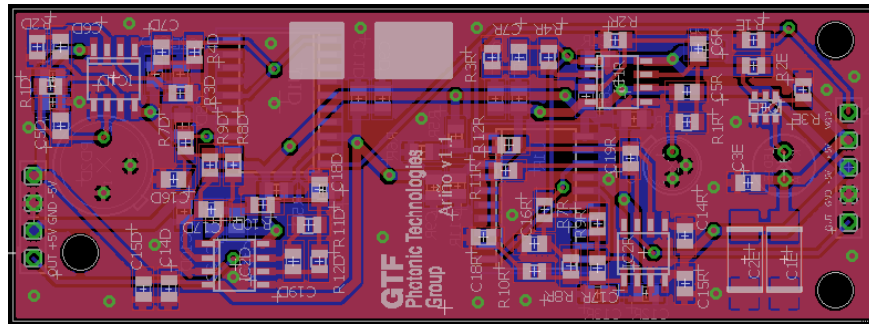


Figura 3.9. PCB de la placa A.

La Figura 3.10 muestra el esquemático de la placa B que se sitúa encima de las otras seis placas pequeñas replicadas. Contiene la placa Arduino, el *shield* de ZigBee, los dos multiplexores, y los módulos de comunicación de radiofrecuencia. En la Figura 3.11 se puede observar su PCB.

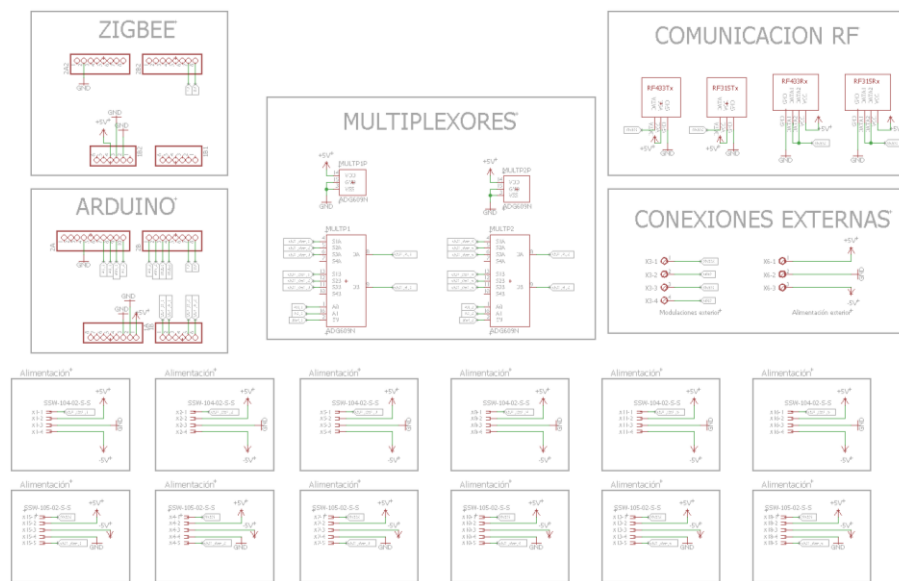


Figura 3.10. Esquemático de la placa B.

Incluye el Arduino, el módulo ZigBee, los multiplexores, y los módulos de radiofrecuencia.

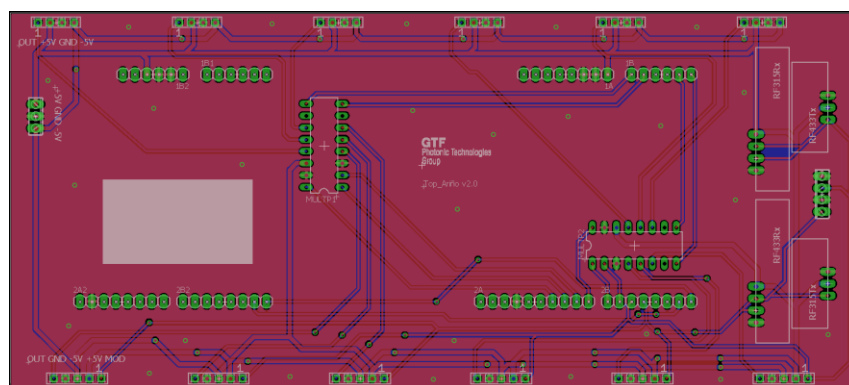


Figura 3.11. PCB de la placa B.

Como alternativa, se ha incluido en el diseño de las placas la opción de poder utilizar cables directos entre los módulos para llevar las señales en lugar de implementar una comunicación XBee, o de radiofrecuencia.

3.4.3. Diseño software

Dentro del diseño *software* se pueden diferenciar dos apartados como son la programación de los Arduinos, y la programación de la aplicación de ordenador, aunque ambas están interconectadas, y van a depender una de la otra.

Proceso de medida: diseño del algoritmo de medida

La tarea del Arduino consiste en adquirir continuamente los datos de todos los Lock-in, y enviarlos al ordenador. Además, ha de generar las dos señales de modulación, y transmitir las por radiofrecuencia tal y como se explica en el apartado 3.2.

El Arduino UNO cuenta con un conversor analógico-digital de 10 bits, y admite entradas con valores entre 0V y 5V, por lo que la precisión que se obtiene es de 5mV (ecuación (3.1)).

$$\text{Precisión Arduino} = \frac{5V}{2^{10}} = \frac{5000mV}{1024} = 4'88mV \quad (3.1)$$

En la Figura 3.12 (izq.) se observa la adquisición de una señal que empieza en 82mV, y que se va reduciendo paulatinamente 2mV cada 10ms, hasta alcanzar los 76mV. Debido a la precisión de 5mV, la medida obtenida oscila entre los valores de 88mV, 83mV, 78mV y 73mV, pero en ningún momento se obtienen los 82mV reales.

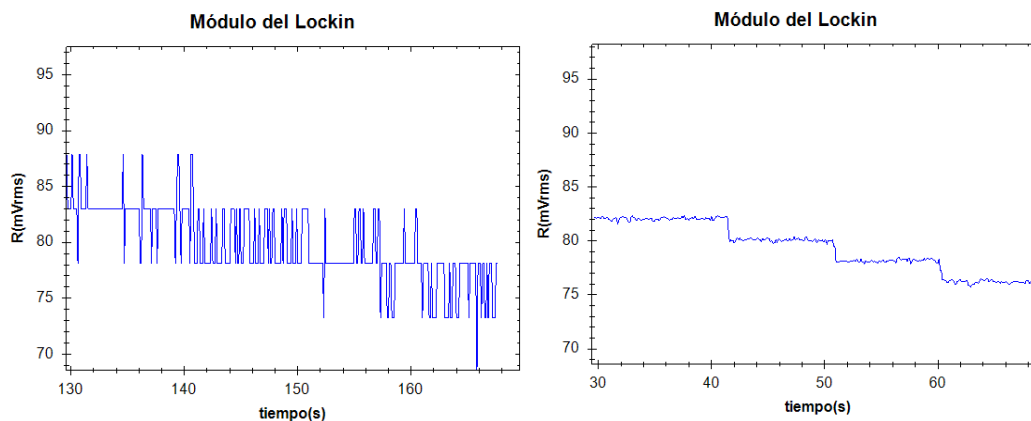


Figura 3.12. Representación sin promediado (izq.) y con promediado de muestras (drcha.).

Para mejorar la precisión del conversor, la forma directa de conseguirlo es aumentando su número de bits, pero esto no es posible ya que es un parámetro fijado por el Arduino. Otra opción, consiste en realizar un promediado de las muestras, para que así, el valor medio se acerque más al valor real. En la Figura 3.12(drcha.) se muestra el resultado de promediar 1000 muestras, lo que supone que la precisión pase de ser de 4'88mV, a ser mil veces menor, concretamente 4'88 μ V.

Sin embargo, promediar 1000 muestras por cada Lock-in, cuando un único Arduino puede llegar a tener hasta 12 Lock-in, y el tiempo que se tarda en leer un dato es de 100 μ s [24], supone que el Arduino tardará 1'2 segundos en ofrecer un nuevo dato al ordenador, lo cual resulta algo

excesivo para esta aplicación. Por eso, se decidió promediar solamente 500 muestras, permitiendo obtener una precisión de $976\mu\text{V}$, y un tiempo entre nuevos datos de 0'6 segundos.

Proceso de comunicación Arduino-PC

Tras adquirir los datos de todos los amplificadores Lock-in, el Arduino debe enviarlos al ordenador. En este trabajo se han implementado dos formas distintas, por cable USB, o inalámbricamente mediante XBee. En ambos casos, se lleva a cabo una comunicación serie entre el ordenador y el Arduino [25] [26].

Destacar que la comunicación Arduino-PC es bidireccional, y en primera instancia se programó una configuración en la que el Arduino reaccionara a las peticiones del ordenador para enviar los datos. Dicho sistema funciona correctamente cuando se usa un cable USB para conectar el Arduino y el PC, pero no es adecuado cuando se usa la tecnología XBee, debido a la gran cantidad de tráfico que se genera (XBee está diseñado para un tráfico de datos reducido). La solución a este problema consistió en reconfigurar el sistema de tal forma que el Arduino envíe los datos directamente, sin necesidad de recibir peticiones.

Además del envío de los datos, el Arduino también está preparado para interactuar con la interfaz gráfica del ordenador y modificar algunos de sus parámetros como pueden ser el número de muestras a promediar, la frecuencia de la señal de modulación, o la velocidad de transmisión de los datos (*BaudRate*). El código implementado se puede ver en el Anexo E.

Interfaz

En este caso, se ha desarrollado una aplicación para Windows basada en el lenguaje de programación C#, junto con *Windows Forms*, la interfaz de programación de aplicación gráfica (API) incluida como parte de Microsoft. El entorno de desarrollo utilizado ha sido *VisualStudio* [12]

El objetivo principal de esta aplicación es agrupar las medidas tomadas por todos los amplificadores Lock-in de todos los módulos, y mostrarlos al usuario de una forma intuitiva y sencilla. Para ello, se establece comunicación con los Arduinos (diferenciados según el puerto COM al que están conectados), y se reciben periódicamente sus datos. Después, se gestionan internamente, para finalmente mostrarlos por pantalla.

En la Figura 3.13 se puede observar la interfaz gráfica diseñada. En ella, cabe la posibilidad (A) de mostrar una única gráfica en la que se representen todos los amplificadores Lock-in de un bloque, o separar cada Lock-in en una gráfica, así como mostrar directamente los valores recibidos en una pantalla de datos. En la Figura 3.13 se muestra la pantalla de datos, en la cual, se indican los valores de todos los amplificadores Lock-in de un módulo. Además, se hace el cálculo del módulo (cociente entre referencia, y reflexión o transmisión), y la desviación. En la parte superior izquierda (B), aparece un botón que sirve para detener, o empezar, la adquisición de datos. Más abajo, aparecen 2 recuadros (C y D). El primero de ellos sirve para seleccionar el módulo, bloque o amplificador Lock-in que se van a representar, mientras que el segundo recuadro sirve para guardar en tiempo real los datos obtenidos, de tal forma que se puedan analizar a posteriori con

una hoja de cálculo. Por último, el botón situado abajo a la derecha (E), reinicia el vector de muestras utilizado para la obtención de la desviación.

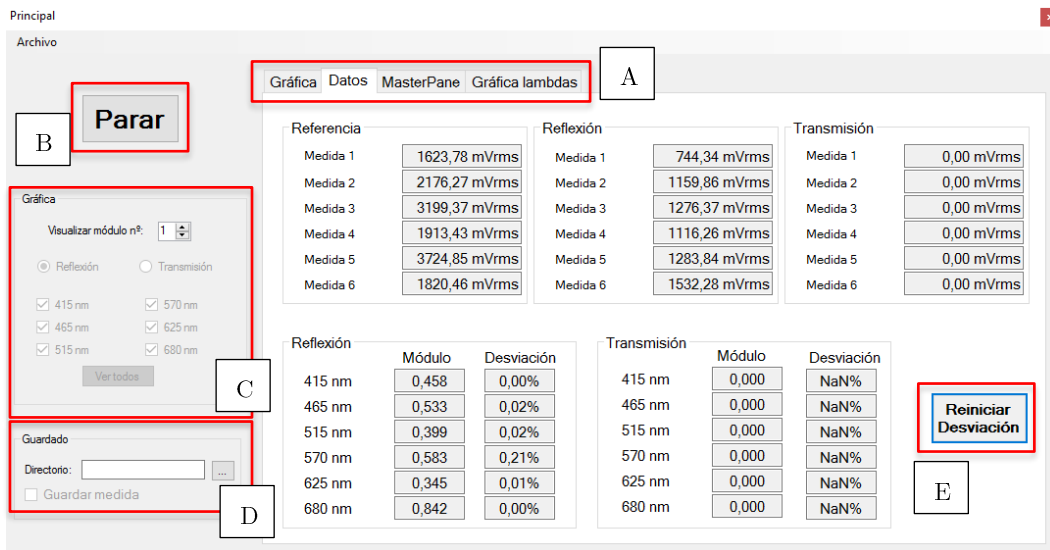


Figura 3.13. Interfaz gráfica de la aplicación de escritorio.

La dificultad del diseño de la aplicación de escritorio reside principalmente en la gestión del gran número de amplificadores Lock-in existentes (90 en total). Para simplificarlo, se han creado varias clases (Figura 3.14). En primer lugar, la clase *espectrofotómetro* configura y almacena cada uno de los módulos existentes (entre 1 y 5). A continuación, la clase *módulo* gestiona los dos bloques que componen un módulo, el de medida de transmisión, y el de medida de referencia y reflexión. Para ello, hace uso de la clase *arduino*, encargada a su vez de establecer la comunicación con los Arduinos. Además, se ha creado una clase llamada *configuración*, y otra llamada *principal*. La primera establece el número de módulos existentes y sus parámetros, mientras que la segunda gestiona la interfaz de usuario, y la creación de la clase *espectrofotómetro*. La distinción entre la clase *principal*, y *espectrofotómetro*, viene motivada por la posibilidad de programar una computación paralela y concurrente, creando un hilo para gestionar la clase *espectrofotómetro* en el caso de notar lentitud en la ejecución del programa.

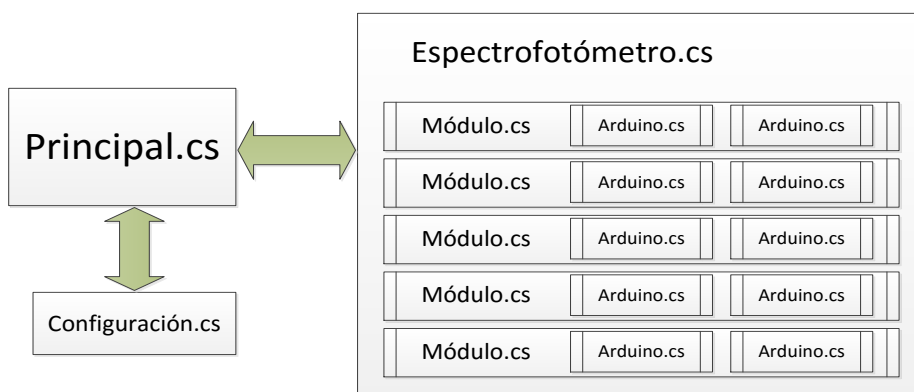


Figura 3.14. Esquema de distribución de clases.

La Figura 3.14, muestra la relación entre las distintas clases programadas. En primer lugar, se crea la clase *principal*, la cual llama a crear una clase *configuración*. En ese momento se establecen los parámetros más importantes para la gestión correcta de cada módulo (Figura 3.15). Una vez finalizada la configuración, se vuelve a la clase *principal*, a la espera de que el usuario comience

la adquisición de datos, momento en el cual se crea la clase *espectrofotómetro*, y todos los objetos *módulo* y *arduino* necesarios.

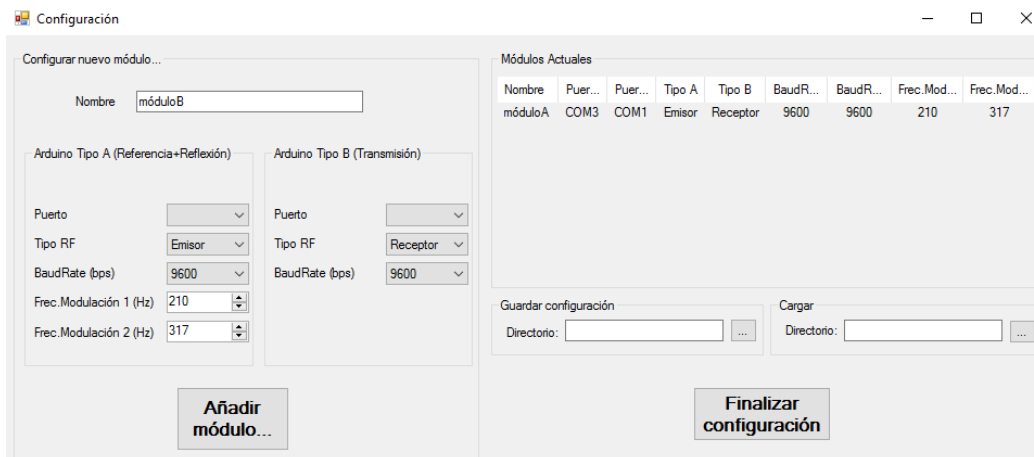


Figura 3.15. Pantalla de configuración.

3.5. Montaje

Tras el diseño de la mecánica, de la electrónica y del software, se llevó a cabo el montaje y ensamblado de todas las partes implicadas. En primer lugar, se soldaron las PCBs necesarias para conformar un primer bloque de medición de referencia y reflexión. Dicho bloque se compone, tal y como se aprecia en la Figura 3.16, de una placa B (B) y 6 placas A (A), sujetadas a un bloque de material plástico negro, y de una caja blanca cuya función es sustentar y embellecer el conjunto. En la placa B, se pueden apreciar los módulos de RF (C), la placa Arduino (D), y el *shield* de XBee (E).

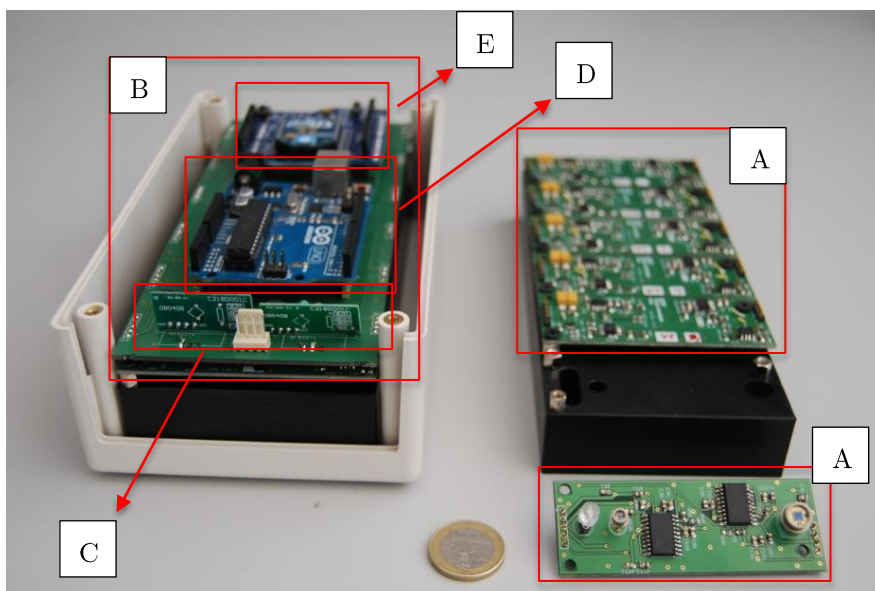


Figura 3.16. Bloque de medición de referencia y reflexión.

A la izquierda se muestra la placa B, con los módulos de RF, el Arduino y el *shield* XBee, mientras que a la derecha se muestran las 6 placas A.

Una vez montado este primer bloque se realizó una fase de testeo y corrección de errores, así como de ajuste de las ganancias de los detectores. A continuación, se soldó un segundo bloque, pero esta vez de medición de transmisión, y se realizó el mismo proceso de testeo y corrección de errores.

Finalmente, se construyó una estructura metálica (Figura 3.17) similar a la que se usará en el futuro en la planta de producción de Ariño. Con ella, nos aseguramos que la distancia entre bloques es la correcta (30cm), y que los bloques están centrados. En la parte superior se sitúa el bloque de transmisión (A), mientras que en la parte inferior se encuentra el bloque de referencia y reflexión (B). Entre medias, a una distancia equidistante entre ambos, se coloca el vidrio a testear (C).

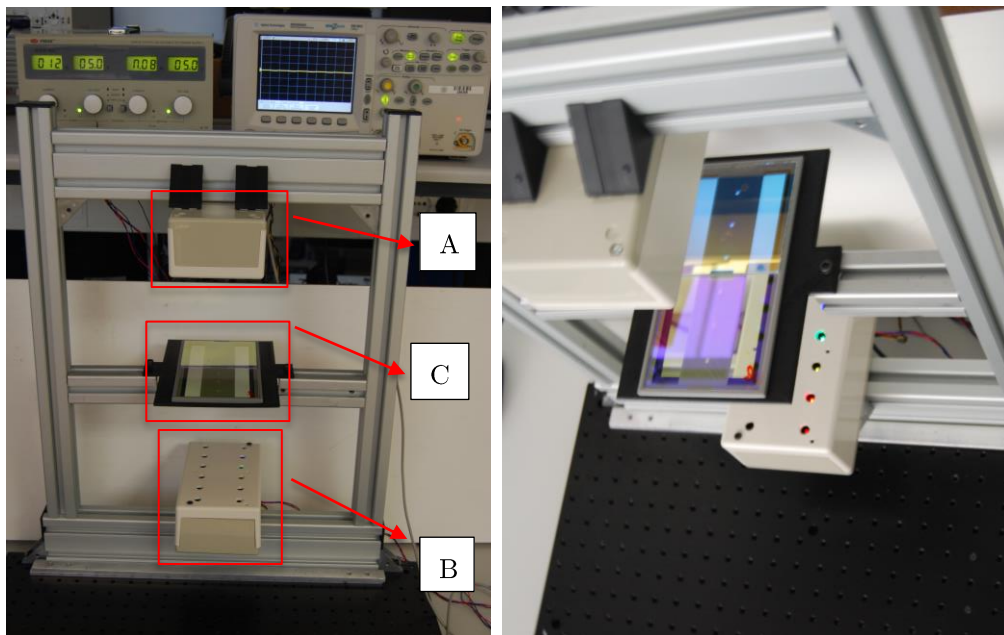


Figura 3.17. Módulo prototipo testeando dos vidrios.

Capítulo 4

Testeo y experimentación del módulo

En este capítulo se recogen las pruebas más importantes realizadas sobre el primer módulo ensamblado, con la finalidad de testear y caracterizar su comportamiento. Para distinguir adecuadamente entre los 6 diodos LED implementados, se va a seguir la numeración indicada en la Tabla 4.1 y que depende de su posición dentro del bloque.

En el caso concreto del LED4 que cubre el rango espectral correspondiente al color amarillo, se detectaron problemas de comportamiento desde el inicio. Esto es debido a que los LEDs disponibles en el mercado a esta longitud de onda (570nm) presentan baja potencia óptica de emisión y diagramas de radiación con zona oscura en la dirección frontal, tal y como se indica en el Anexo A. Por este motivo, se han probado diferentes modelos del fabricante Roithner, mostrados en la Tabla 4.1.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4		LED 5	LED 6
Modelo	VL415-5-15	RLS-B465	LED515-10-30	4.1	LED570-06	B5-435-TL	LED680-02AU
				4.2	B5B-433-20		
				4.3	B5B-434-TY		
Longitud de onda	415nm	465nm	515nm	4.1	570nm	625nm	680nm
				4.2	570nm		
				4.3	588nm		

Tabla 4.1. Numeración de los LEDs.

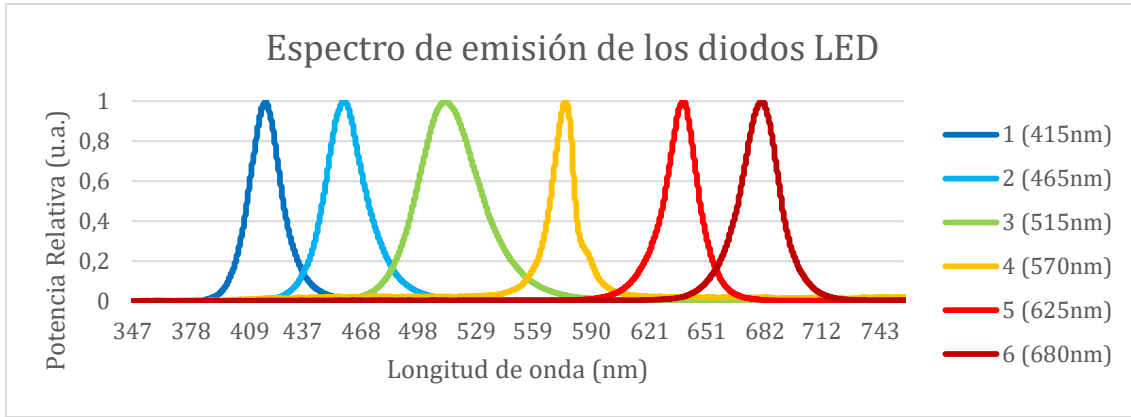


Figura 4.1. Espectro de emisión de los 6 diodos LED.
 Medidas realizadas con el espectrofotómetro comercial OceanOptics USB4000-XR1-ES.

4.1. Estabilidad y tiempo de medida

La primera prueba realizada consistió en verificar la estabilidad de las medidas en un breve espacio de tiempo, concretamente 30 segundos. Los resultados finales se muestran en la tabla 4.2. Indicar que en un primer momento se detectaron inestabilidades en las medidas asociadas al LED4, tal y como se detalla en el Anexo A, y que se resolvieron según se indica en el propio anexo.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Desviación Reflexión	0'14%	0'05%	0'10%	0'08%	0'09%	0'15%
Desviación Transmisión	0'09%	0'09%	0'12%	0'11%	0'06%	0'30%

Tabla 4.2. Estabilidad de las medidas.
 Valores obtenidos transcurridos 30 segundos de funcionamiento del sistema.

Los resultados demuestran un comportamiento muy bueno en todos los canales ya que en todos los casos queda por debajo del 0'5%.

Una vez comprobada la estabilidad, se cuantificó el tiempo de respuesta del amplificador Lock-in analógico, y se observó que requería algo más de 2 segundos, dato excesivo en una aplicación donde el objetivo es adquirir medidas en tiempo real.

Basándose en el estudio realizado en el apartado 2.5.2, el cual demuestra que modificar la frecuencia de corte del filtro paso bajo no afecta de manera significativa en el error obtenido en nuestras condiciones de medida, se decidió sustituir los filtros de los amplificadores Lock-in analógicos del módulo.

Para diseñar el filtro y calcular el valor de sus componentes, se usó la *toolbox* de Matlab llamada "Analog Filter Designer". Con ella, se selecciona el tipo de filtro, el orden, la frecuencia de corte y la ganancia deseada (Figura 4.2), y a continuación se elige el número de etapas, y el tipo de circuito (Figura 4.3).

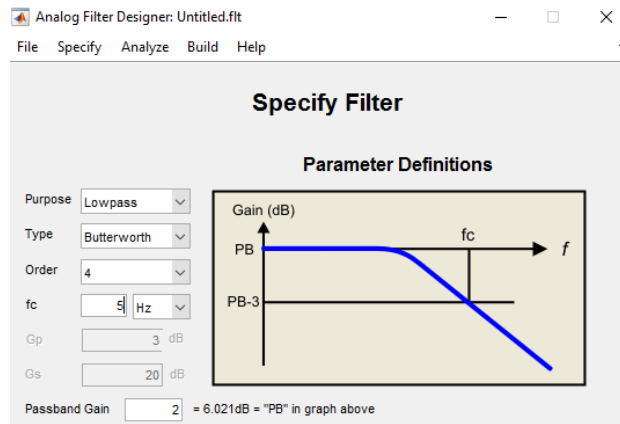


Figura 4.2. Pantalla inicial del creador de filtros.

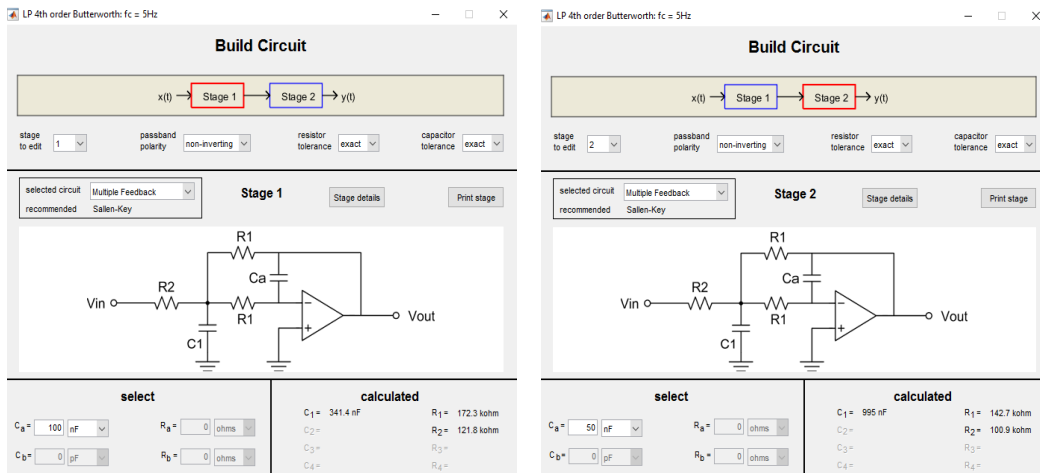


Figura 4.3. Diseño del filtro paso bajo de dos etapas.

A la izquierda, la etapa 1. A la derecha, la etapa 2. Seleccionando el valor de los condensadores “Ca”, la aplicación calcula el valor del resto de componentes.

La frecuencia de corte del nuevo filtro se decidió que fuera de 5Hz, frente a los 0’53Hz del anterior. La Figura 4.4 muestra una comparativa de ambos. El cambio es bastante significativo, ya que pasamos de un tiempo de respuesta de algo más de 2 segundos ($f_c=0’53\text{Hz}$), a otro menor de un segundo ($f_c=5\text{Hz}$).

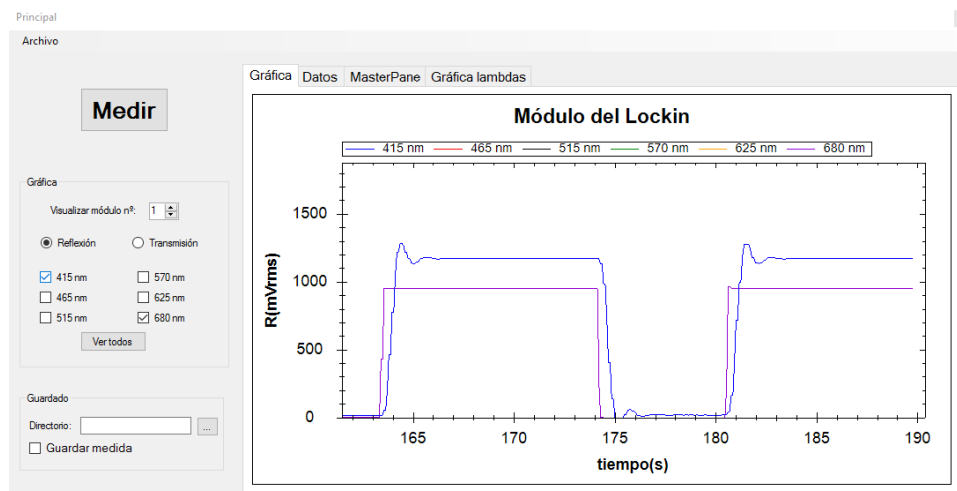


Figura 4.4. Comparación frecuencia de corte del filtro paso bajo.

Línea azul corresponde al filtro de frecuencia de corte 0’53Hz, mientras que la morada corresponde al filtro con frecuencia de corte de 5Hz.

Una vez cambiados los filtros de todos los amplificadores Lock-in del módulo, se volvió a repetir la medida de estabilidad. Como se puede comprobar en la Tabla 4.3, el cambio realizado no ha afectado a los resultados de estabilidad ya que se obtienen valores muy similares a los de la Tabla 4.2.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Desviación Reflexión	0'15%	0'03%	0'11%	0'09%	0'08%	0'09%
Desviación Transmisión	0'08%	0'07%	0'11%	0'10%	0'07%	0'12%

Tabla 4.3. Estabilidad de las medidas con el nuevo filtro.

Valores obtenidos transcurridos 30 segundos de funcionamiento del sistema.

4.2. Crosstalk

Una vez comprobada la estabilidad de los amplificadores Lock-in, el siguiente paso consistió en caracterizar el *crosstalk* de los canales ya que la distancia entre bloques (30cm) es suficiente para que exista un ensanchamiento del haz que provoque la mezcla de señales en detección, y en definitiva, una distorsión de los resultados. Como ya se comentó en el apartado 3.2.4, en el diseño del espectrofotómetro se tuvo muy en cuenta este efecto y por ello se adoptaron las medidas necesarias. Por un lado, un diseño mecánico adecuado a las condiciones de guiado de los canales de salida de los haces de los LEDs, tal y como se detalla en los Anexos B y C. Y por otro lado, el uso de dos frecuencias de modulación distintas. En este caso, los LEDs 1, 3 y 5 comparten una, mientras que los LEDs 2, 4 y 6 utilizan otra distinta, de tal forma que el efecto de *crosstalk* solo podría aparecer entre aquellos canales que utilizan la misma modulación.

Para caracterizar el *crosstalk* se han tomado medidas de cada uno de los canales tapando alternativamente uno de los LEDs (Tabla 4.4), y a continuación se ha calculado el porcentaje de *crosstalk* existente (Tabla 4.5). Para entender las tablas, hay que tener en cuenta que las filas indican qué LED se ha tapado en ese momento, mientras que las columnas muestran los valores obtenidos en cada uno de los LEDs. Los resultados demuestran que apenas existe *crosstalk*, ya que los porcentajes obtenidos son en todo caso menores del 0'5%.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Sin tapar	2965	4448	3600	1766	4270	3922
Tapando el 1	0	4453	3602	1766	4268	3920
Tapando el 2	2965	0	3607	1760	4268	3920
Tapando el 3	2953	4448	0	1768	4253	3919
Tapando el 4	2963	4443	3602	0	4263	3915
Tapando el 5	2963	4442	3595	1766	0	3913
Tapando el 6	2965	4448	3608	1762	4261	0

Tabla 4.4. Amplitudes obtenidas (mV) tapando uno de los LEDs.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Tapando el 1	0	-	-0'06%	-	0'05%	-
Tapando el 2	-	0	-	0'34%	-	0'05%
Tapando el 3	0'41%	-	0	-	0'40%	-
Tapando el 4	-	0'11%	-	0	-	0'18%
Tapando el 5	0'07%	-	0'14%	-	0	-
Tapando el 6	-	0'00%	-	0'23%	-	0

Tabla 4.5. Caracterización Crosstalk. Medidas en tanto por ciento.

4.3. Estabilidad en ciclo

Esta prueba consiste en la introducción del prototipo en una maquina climática de tal forma que se simulen distintos rangos de temperatura y se pueda comprobar su respuesta a estos cambios. En la Figura 4.5 y la Figura 4.6 se muestra la desviación obtenida para los cocientes entre la reflexión y la transmisión en un ciclo de temperaturas 20°C/35°C/20°C. Para el cálculo de la desviación se ha utilizado la ecuación (2.1). En las figuras se observa que las variaciones de temperatura afectan en gran medida a los detectores, ya que se obtienen desviaciones bastante elevadas, entre -1'4% y 2%. Además, cada uno responde de una forma totalmente distinta, sin apreciarse un patrón fijo.

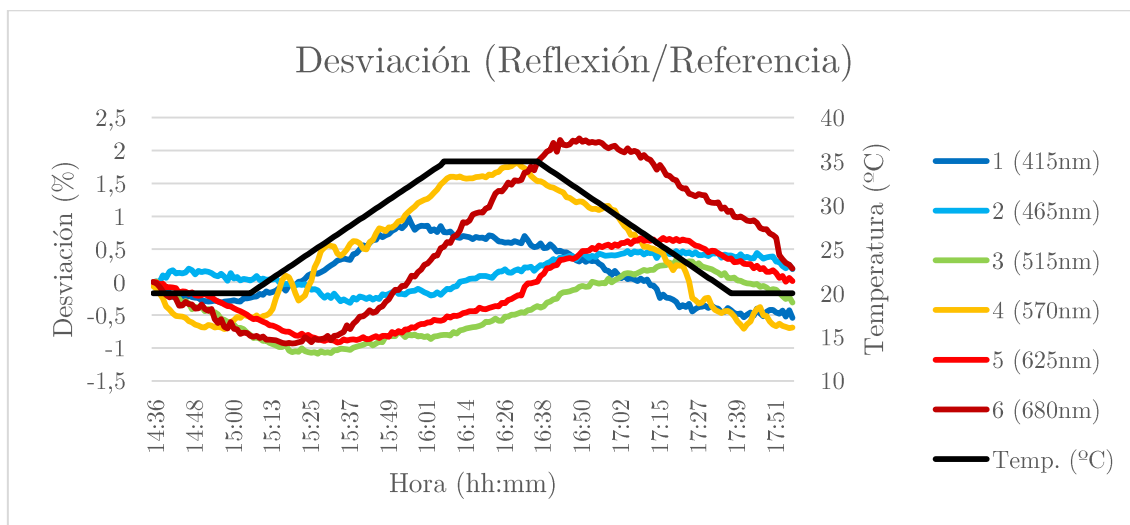


Figura 4.5. Desviación para la medida de reflexión.

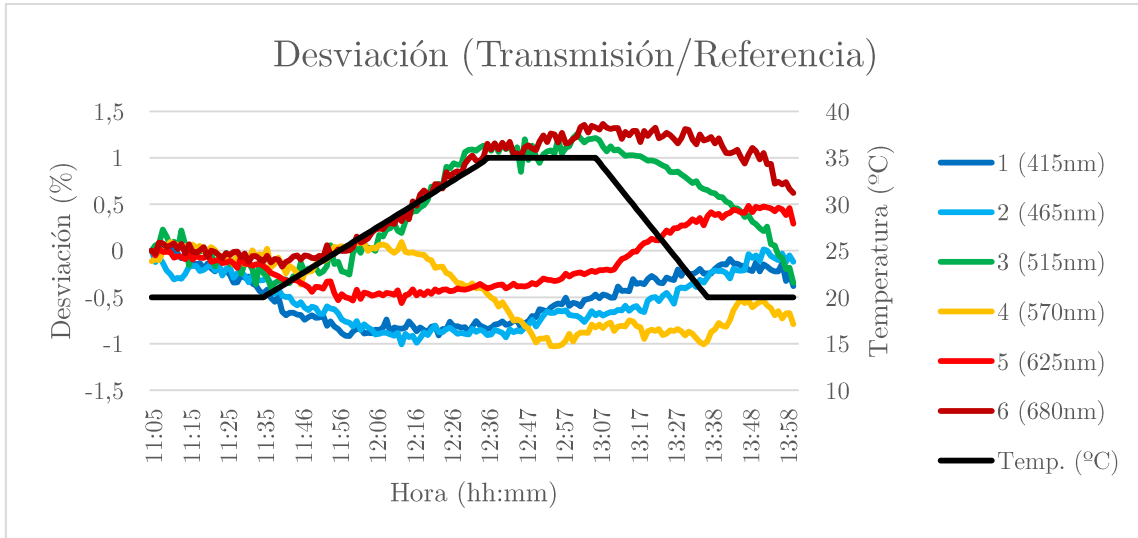


Figura 4.6. Desviación para la medida de transmisión.

Estas variaciones suponen un gran inconveniente en cuanto al diseño y fabricación del espectrofotómetro, ya que obliga a idear un sistema adicional de calibración periódica para resolver este problema. Un estudio de las causas de estas variaciones y de sus posibles soluciones queda fuera del alcance del proyecto y se contempla como acciones a realizar por el grupo GTF en un futuro próximo.

4.4. Medida de muestras con capa

Como comprobación de las capacidades de medida de reflexión y de transmisión en capas depositadas sobre vidrio, se ha utilizado el módulo construido para medir los coeficientes de transmitancia y de reflectancia de dos muestras de vidrio con color. En la Figura 4.7 y la Figura 4.8 se muestran las curvas espectrales de los vidrios, obtenidas en un espectrofotómetro de laboratorio, y, sobre estas curvas, los puntos de reflectancia y transmitancia medidos por el módulo. Se puede observar que las medidas son correctas. En cualquier caso, será necesario realizar una batería de medidas sobre un conjunto más amplio de muestras para validar finalmente el sistema, tarea que queda fuera del alcance del presente proyecto y que será uno de los trabajos a realizar en un futuro próximo.

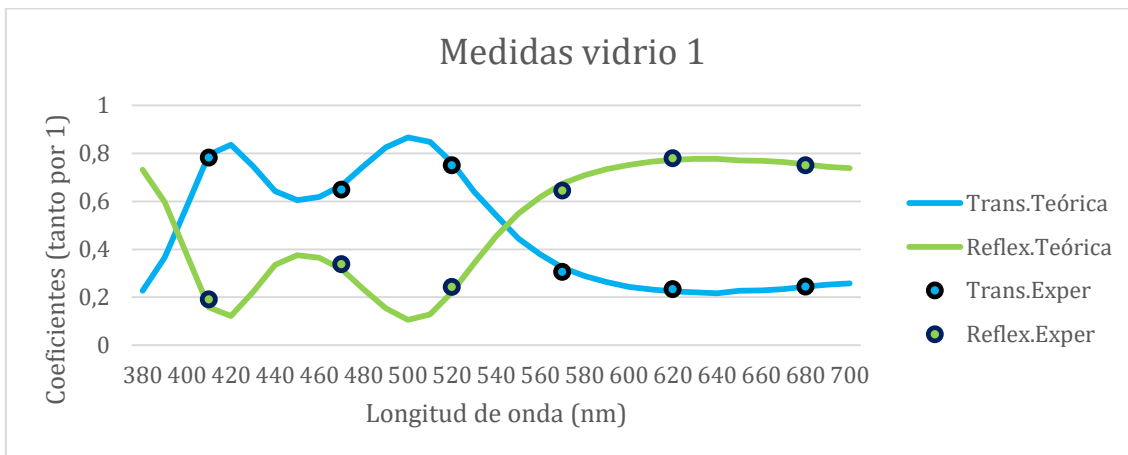


Figura 4.7. Vidrio 1. Comparativa del módulo desarrollado frente a espectrofotómetro de laboratorio.

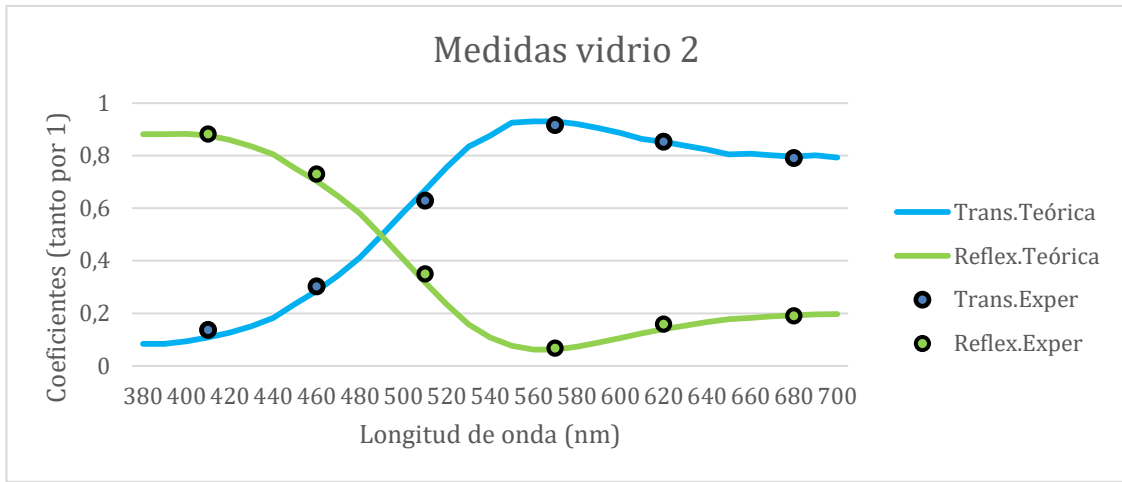


Figura 4.8. Vidrio 2. Comparativa del módulo desarrollado frente a espectrofotómetro de laboratorio.

Capítulo 5

Conclusiones

A lo largo de este Trabajo Fin de Máster se ha acometido el estudio y la comparativa entre el amplificador Lock-in analógico y el digital, así como el diseño de un espectrofotómetro en línea para medida de color en vidrios de capa y la fabricación de un primer módulo de dicho espectrofotómetro.

En primer lugar, se ha llevado a cabo el diseño y montaje de un sistema que permite la comparativa de los dos tipos de amplificador Lock-in, analógico y digital, compartiendo los mismos elementos de detección. Para ello, se han diseñado dos placas PCB y se ha realizado un montaje de experimentación de tal forma que permitiera realizar un estudio comparativo en situaciones de muy baja señal óptica, de unos pocos nW. Los resultados demuestran que ambos tipos de amplificador Lock-in se comportan de forma similar, estabilidad mejor del 0'2%, para señales ópticas por encima de 5nW. Sin embargo, por debajo de este nivel de potencia, la detección digital sube al 1% para 0'5nW, mientras que el analógico muestra un comportamiento mejor y se mantiene por debajo de 0'5%. El resultado de este estudio ha sido ya utilizado dentro del grupo GTF para el rediseño de la detección del equipo de medida portátil de reflectancia para espejos de plantas solares (Condor II), desarrollado en GTF, que en su primer prototipo implementaba Lock-in digital y actualmente, en su segunda versión, implementa Lock-in analógico, mejorando considerablemente sus capacidades de medida.

En segundo lugar, se ha diseñado el espectrofotómetro en línea para el control de la producción de vidrios de la empresa Ariño Duglass S.A, llevando a cabo tanto el diseño óptico y mecánico, como el electrónico. Además, se ha realizado la programación de Arduino, y los dispositivos XBee, junto al desarrollo de un software de medida en C#. Dentro del TFM se ha desarrollado un primer módulo de medida de los 5 que componen el espectrofotómetro, sirviendo como prototipo con el que poder verificar el funcionamiento que tendrá el sistema final. Los resultados de estos experimentos han permitido identificar los problemas del sistema y rediseñar los módulos antes de acometer, en un futuro, la fabricación del sistema completo para la línea de producción de Ariño. Destacar por ejemplo las problemáticas asociadas al LED de longitud de onda 570nm (amarillo) y al *crossstalk* entre canales, ambas analizadas dentro del proyecto y a las que se les ha dado una solución satisfactoria. Por otro lado, el estudio de las causas de las variaciones con la temperatura y de sus posibles soluciones queda fuera del alcance del proyecto y se contempla como acciones a realizar por el grupo GTF en un futuro próximo.

Una posible línea de trabajo que puede plantearse tras este proyecto y que podría ser de utilidad dentro del grupo GTF es la implementación de Arduino y *Xbee* para equipos de medida, tanto en campo como en laboratorio, dada su sencillez de manejo y versatilidad.

A título personal, el gran atractivo de este proyecto ha residido en su diversidad, ya que conlleva el aprendizaje en múltiples áreas como, por ejemplo, óptica, electrónica y modelado 3D, además de conocimientos en programación de microcontroladores (Arduino) y aplicaciones de escritorio (C#).

Bibliografía

- [1] R. E. Záforas, *Desarrollo de un amplificador síncrono de bajo coste para detección de señales ópticas mediante una tarjeta DSP*, Zaragoza, 2004.
- [2] PerkinElmer, «What is a Lock-In Amplifier?,» Marzo 2106. [En línea]. Available: <http://www.univie.ac.at/photovoltaik/umwelt/ws2015/What%20is%20a%20Lock-in%20amplifier.pdf>.
- [3] C. V. D. Wal, *Noise and Interference, the Lock-In Amplifier, (and the IV-meetkast)*, 2004.
- [4] Stanford Research Systems, «About Lock-In Amplifiers,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>.
- [5] CadSoft, «Eagle PCB Design,» [En línea]. Available: <https://cadsoft.io/>. [Último acceso: Marzo 2106].
- [6] LabJack, «LabJack Measuremetn&Automation U3 series,» [En línea]. Available: <https://labjack.com/products/u3>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [7] Wikipedia, «Amplificador operacional,» Marzo 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional. [Último acceso: Marzo 2016].
- [8] Analog Devices, «AD630. Balanced Modulator/Demodulator,» 2015.
- [9] Wikipedia, «Filtro de Butterworth,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_Butterworth. [Último acceso: Julio 2016].
- [10] M. D. Zambrano, «Filtro activo paso bajo con Amplificador Operacional frecuencia de corte, ganancia,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://amplificadoroperacional.blogspot.com.es/2010/07/filtro-activo-paso-bajo-con.html>.
- [11] OKAWA Electric Design, «Multiple Feedback Low-pass Filter Design Tool,» [En línea]. Available: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPTazyuLowkeisan.htm>. [Último acceso: Junio 2016].
- [12] Microsoft, «Visual Studio,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.visualstudio.com/es-es/visual-studio-homepage-vs.aspx>.
- [13] KEYSIGHT TECHNOLOGIES, «81150A Pulse Function Arbitrary Noise Generator,» [En línea]. Available: <http://www.keysight.com/en/pd-1287544-pn-81150A/pulse-function-arbitrary-noise-generator?nid=-536902255.748669.00&cc=ES&lc=spa>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [14] Arduino, «Arduino,» Abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [15] Arduino, «tone(),» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Tone>. [Último acceso: Abril 2016].
- [16] Atmel, «ATmega328P,» [En línea]. Available: <http://www.atmel.com/devices/ATMEGA328P.aspx>. [Último acceso: Abril 2016].
- [17] T. King, M. A. Osborne, J. Y. Peng y B. King, «Arduino Timers and Interrupts,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://arduino-info.wikispaces.com/Timers-Arduino>.
- [18] O. Liang, «Arduino Timer and Interrupt Tutorial,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://oscarliang.com/arduino-timer-and-interrupt-tutorial/>.
- [19] PROMETEC, «Arduino y los timers,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.prometec.net/timers/>.

- [20] RobotFreak, «Arduino 101: Timers and Interrupts,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://letsmakerobots.com/content/arduino-101-timers-and-interrupts>.
- [21] Wikipedia, «ZigBee,» Junio 2016. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/ZigBee>.
- [22] Wikipedia, «SolidWorks,» Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.
- [23] Wikipedia, «Lapeado,» Julio 2016. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Lapeado>.
- [24] Arduino, «AnalogRead,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>. [Último acceso: Mayo 2016].
- [25] M. Bertschi, «Arduino, C#, and Serial Interface,» Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.codeproject.com/Articles/473828/Arduino-Csharp-and-serial-interface>.
- [26] Limor, «Arduino Tutorial,» Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.ladyada.net/learn/arduino/lesson4.html>.
- [27] G. B. Armen, «Phase sensitive detection: the lock-in amplifier,» Abril 2008. [En línea]. Available: <http://www.phys.utk.edu/labs/modphys/lock-in%20amplifier%20experiment.pdf>.
- [28] R. Faludi y M. Richardson, «Basic XBee ZB ZigBee (Series 2) Chat,» Mayo 2016. [En línea]. Available: <http://examples.digi.com/get-started/basic-xbee-zb-zigbee-chat/>.
- [29] Wikipedia, «Lock-in amplifier,» Febrero 2016. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lock-in_amplifier.

ANEXOS

Anexo A

Testeo del diodo LED número 4

En las pruebas de estabilidad en medidas de 30 segundos, se puso de manifiesto una inestabilidad asociada al LED4 sobre las señales de transmisión y de reflexión (no sobre la referencia). Por ello, se realizaron pruebas sobre 3 modelos de diodos LED en la longitud de onda de 570nm, tras las cuales se concluyó que este problema estaba relacionado con la baja emisión del diodo LED.

En la Tabla A.1 se indican los 3 diodos LED probados. En el primer caso, en un primer momento se pensó que el problema de la inestabilidad podía ser debido al diagrama de radiación, ya que como se observa en la Figura A.1, existe un mínimo de emisión en 0° . Para corroborar la suposición, se sustituyó el diodo LED 4.1, por el 4.2, el cual tiene su máximo de emisión en 0° , tal y como se indica en la Figura A.2. Los resultados de la Tabla A.1 demuestran que el cambio supuso una mejora, aunque no fue suficiente ya que se seguían obteniendo valores muy por encima del 0'1%. Por lo tanto, la emisión seguía siendo muy baja. El problema en este nuevo LED está en que su luminiscencia es de 4'5cd, frente a las 7'8cd del primero. Por ello, se probó un LED de mayor intensidad luminosa (13'5cd) pero teniendo que pasar a una longitud de onda mayor (588nm) ya que en 570nm no se encontraron LEDs disponibles comerciales de mayores intensidades. Como se puede observar en la tabla, esta mayor intensidad luminosa mejoró considerablemente la inestabilidad de las medidas.

	LED 4.1	LED 4.2	LED 4.3
Modelo	LED570-06	B5B-433-20	B5B-434-TY
Longitud de onda	570nm	570nm	588nm
Intensidad luminosa	7'8cd	4'5cd	13'5cd
Desviación Reflexión	1'20%	0'55%	0'17%
Desviación Transmisión	2'11%	0'64%	0'18%

Tabla A.1. Estabilidad de las medidas.

Valores obtenidos transcurridos 30 segundos de funcionamiento del sistema.

En este punto, se calculó la potencia óptica disponible en los fotodiodos, encontrándose en el rango de 5nW a 15nW. De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 2 para el Lock-in analógico, se esperaría una estabilidad mejor del 0'2%. Esto indica que existe una fuente de inestabilidad que no se ha considerado. Tras analizar las condiciones de medida en los módulos, se identificó dicha fuente: el LED4 de nivel de intensidad luminosa bajo se encontraba ubicado ente los LEDs 3 y 5 de intensidades luminosas altas. Dado que ente canales adyacentes existe visión de sus haces de luz, y debido a la alta ganancia necesaria en los fotodiodos que trabajan para el LED4, se tiene aquí el origen de la inestabilidad. Como solución sencilla y directa, se procedió a reubicar los LEDs, colocándose el LED4 en la primera posición junto al LED1, de baja intensidad, para evitar así este problema. De esta forma, las medidas de estabilidad mejoraron tal y como refleja la Tabla 4.2 en el capítulo 4.

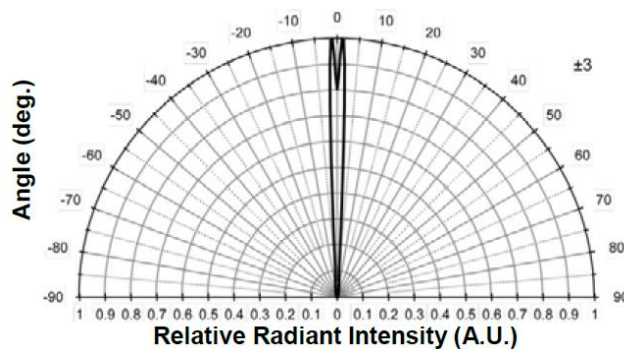


Figura A.1. Diagrama de radiación del diodo LED número 4.1.

Extraído de la hoja de características del fabricante, Roithner LaserTechnik.

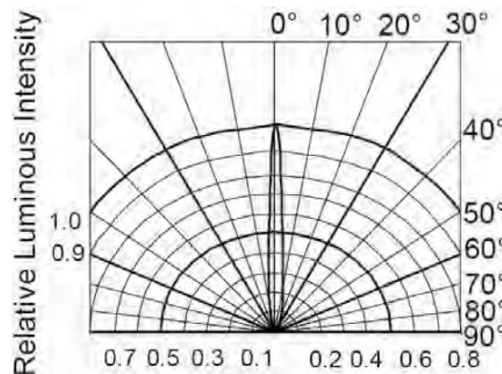


Figura A.2. Diagrama de radiación del diodo LED número 4.2.

Extraído de la hoja de características del fabricante, Roithner LaserTechnik.

Anexo B

Verificación crosstalk

Este Anexo recoge las primeras pruebas de *crosstalk* (Tabla B.1 y Tabla B.2), realizadas sobre el prototipo. En ellas se observa que sí que existe acoplamiento de señal entre canales, llegando a ser bastante apreciable en los LED número 3 y 5.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Sin tapar	4341	4762	3776	4291	4736	4161
Tapando el 1	0	4776	3746	4370	4729	4140
Tapando el 2	4330	0	3768	4638	4718	4095
Tapando el 3	4062	4792	0	2566	4495	4119
Tapando el 4	4320	4733	3766	14	4718	4102
Tapando el 5	4320	4745	3615	4995	0	4109
Tapando el 6	4400	4750	3770	4700	4710	0

Tabla B.1. Amplitudes obtenidas en milivoltios, tapando uno de los LEDs.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Tapando el 1	0	-	0'80%	-	0'15%	-
Tapando el 2	-	0	-	-7'48%	-	1'61%
Tapando el 3	6'87%	-	0	-	5'36%	-
Tapando el 4	-	0'61%	-	14	-	1'44%
Tapando el 5	0'49%	-	4'45%	-	0	-
Tapando el 6	-	0'25%	-	-8,70%	-	0

Tabla B.2. Caracterización inicial del Crosstalk. Medido en tanto por ciento.

La causa del *crossstalk* está en el color y/o material del bloque, ya que es un plástico de color negro brillante que no atenúa adecuadamente los rayos no directos de los diodos LED. Por lo tanto, el canal perforado en el bloque no tiene el efecto esperado y el haz de luz se ensancha en exceso a su salida debido al proceso de guiado con múltiples rebotes de los haces en las paredes del canal. Para solucionarlo se probó a roscar los canales, de tal forma que se rompiera la condición de guiado. Aunque esta solución funcionaba razonablemente bien, no se conseguía eliminar del todo el *crossstalk*, por lo que se probó a taladrar una abertura rectangular en la entrada del canal, eliminando el guiado de los haces en el eje paralelo a los diodos y evitando de esa forma que los haces de luz fueran a parar a LEDs contiguos. Esto se observa en la Figura B.1.



Figura B.1. Fotografía de los haces de luz proyectados a una distancia de 15cm

Esta solución sí que conseguía eliminar el *crossstalk* entre canales por lo que se adoptó como medida final. El mecanizado final de la pieza de material plástico, se observa en la Figura B.2. A su izquierda se muestra como la apertura del canal en el eje perpendicular a la línea de LEDs se mantiene igual que en el diseño inicial, mientras que a la derecha de la figura se muestra el canal ensanchado.

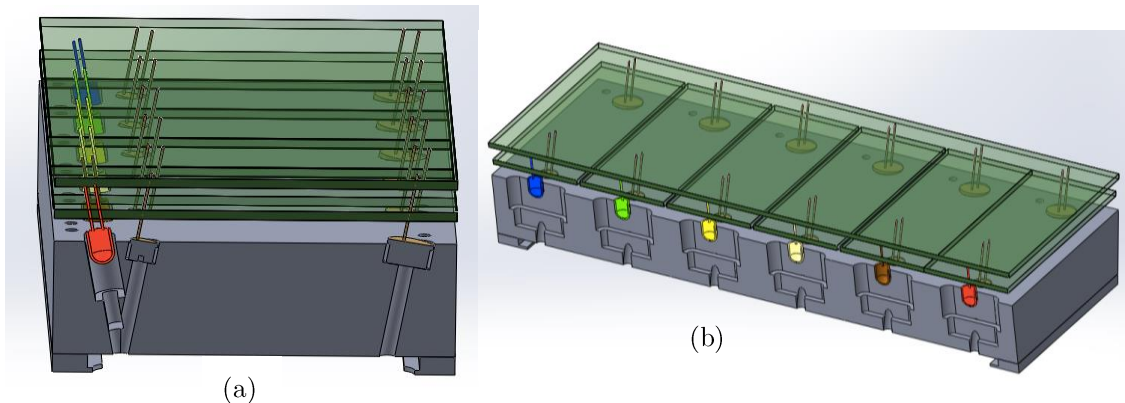


Figura B.2. Mecanizado final de la pieza.
Perfil frontal (izq.). Perfil lateral (drcha.).

Otra posible solución al problema de *crossstalk* consistiría en la generación de un número mayor de frecuencias de modulación diferentes. De ese modo, la separación espacial entre canales con la misma señal de modulación aumentaría, reduciendo el *crossstalk*. Pero esta solución requiere de un rediseño completo de la placa B.

Anexo C

Planos

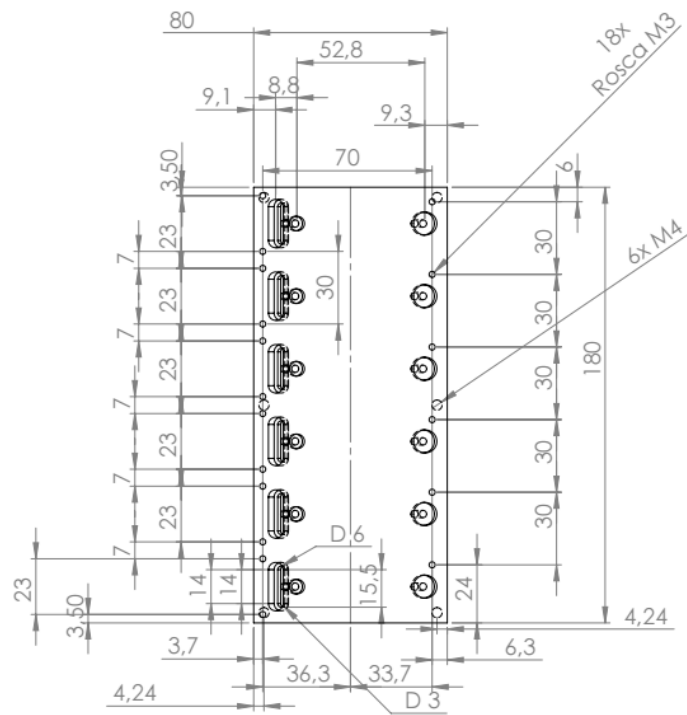


Figura C.1. Perfil superior del bloque.

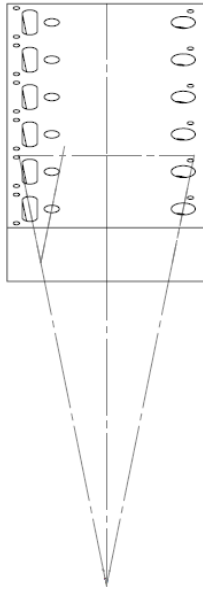


Figura C.2. Vista general del bloque diseñado en SolidWorks.

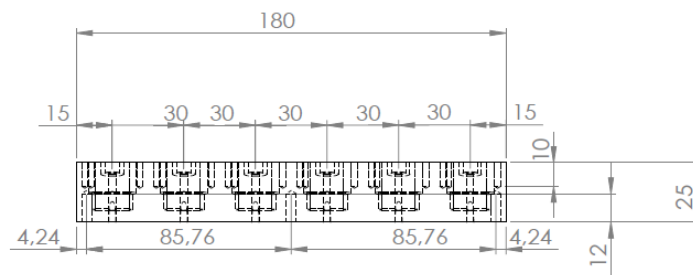


Figura C.3. Perfil lateral del bloque.

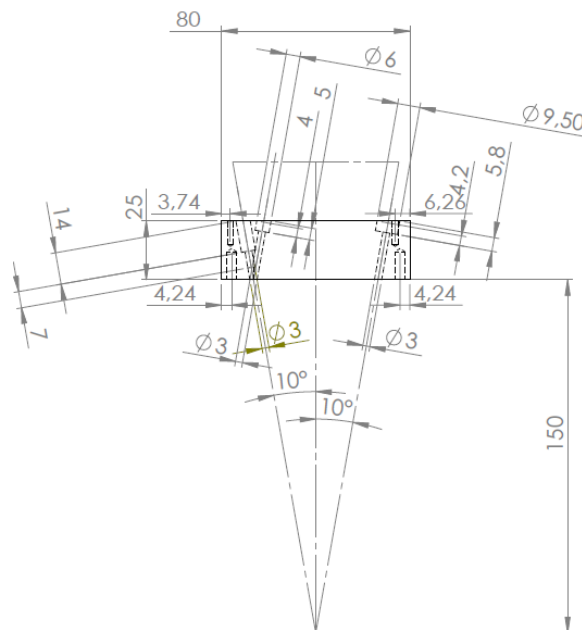


Figura C.4. Perfil frontal del bloque.

Anexo D

Esquemáticos

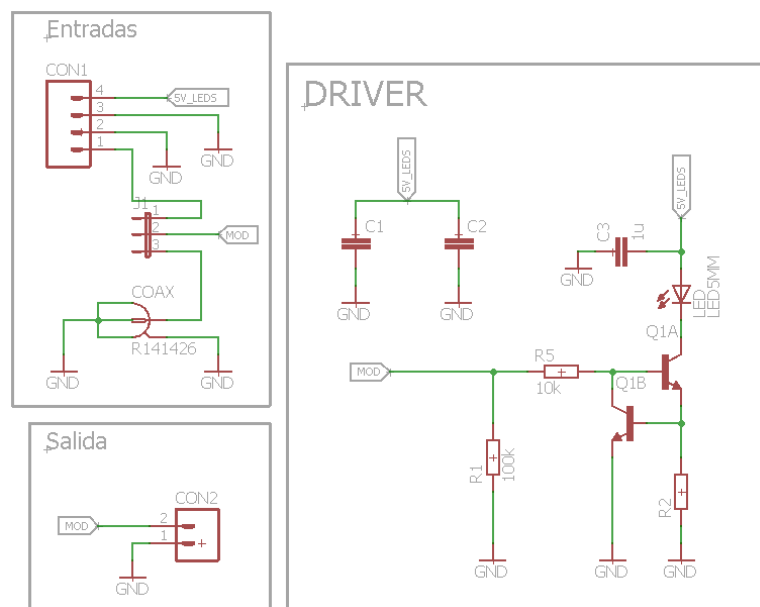


Figura D.1. Esquemático de la placa E.

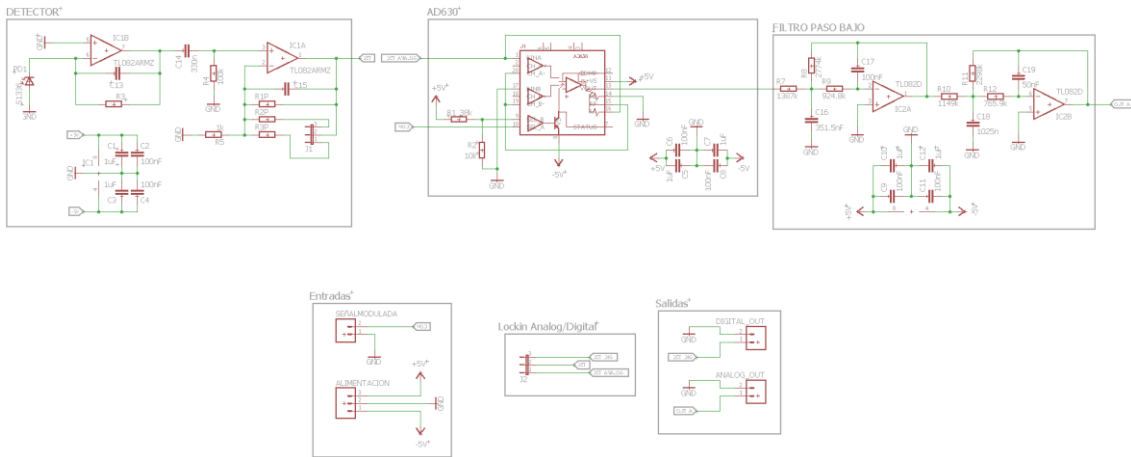


Figura D.2. Visión completa del esquemático de la placa R.

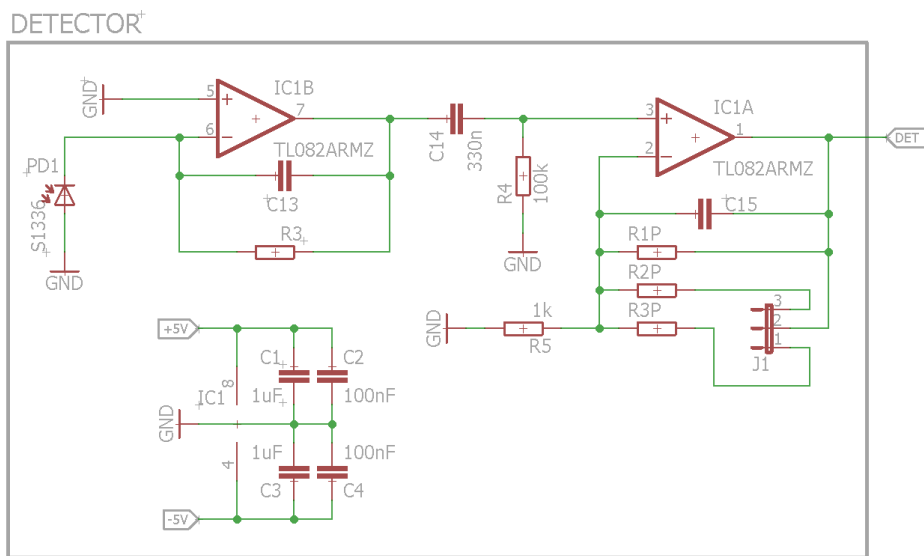


Figura D.3. Bloque detector. Esquemático de la placa R.

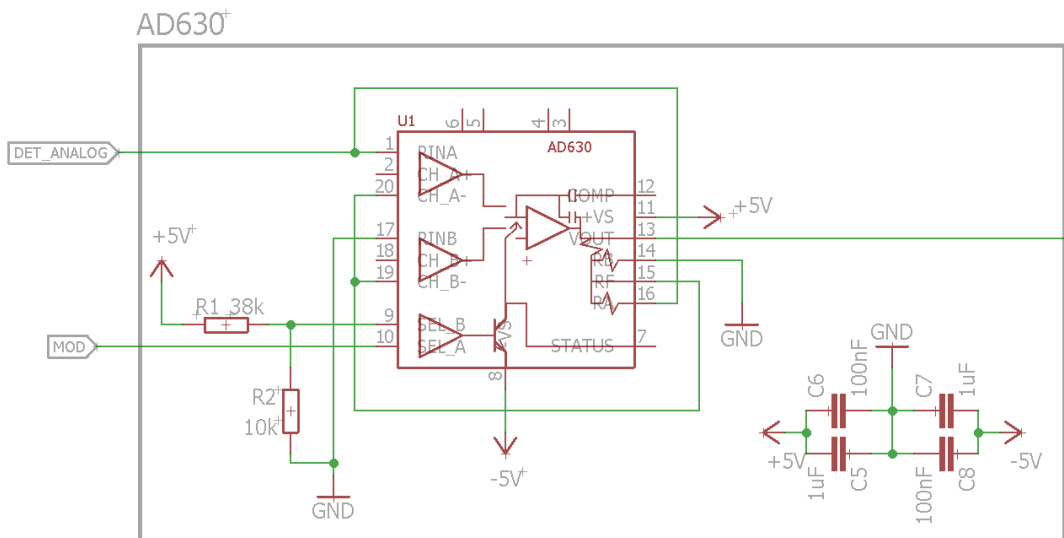


Figura D.4. AD630. Esquemático de la placa R.

FILTRO PASO BAJO

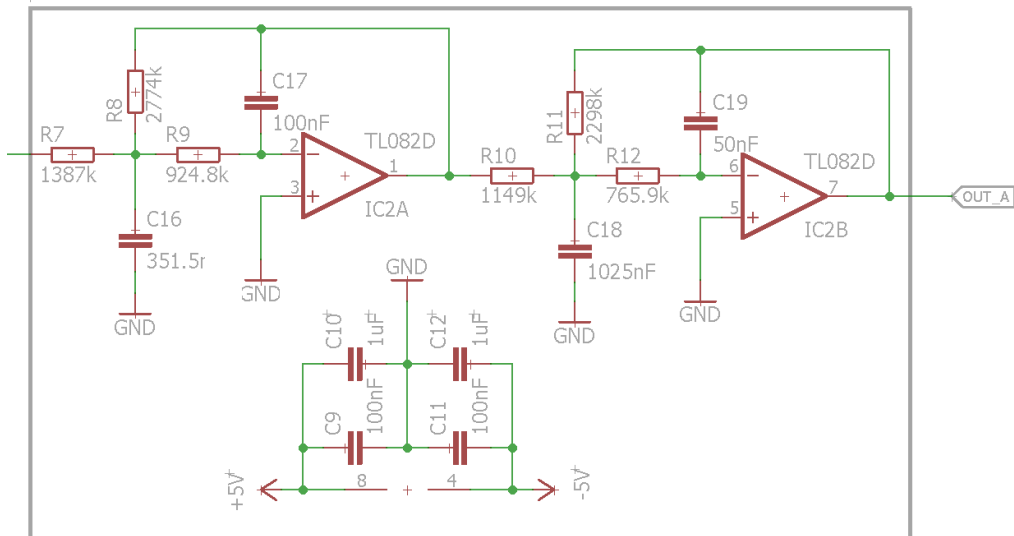


Figura D.5. Filtro paso bajo. Esquemático de la placa R.

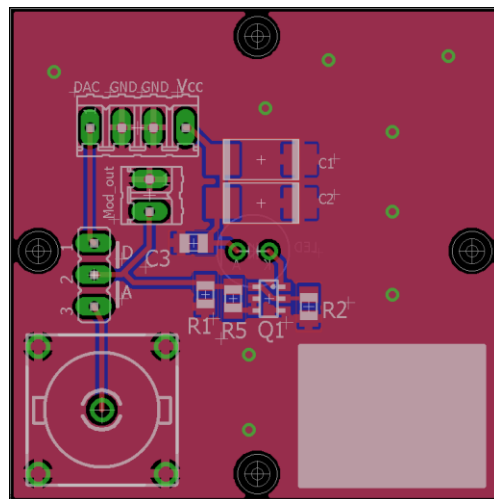


Figura D.6. PCB de la placa E.

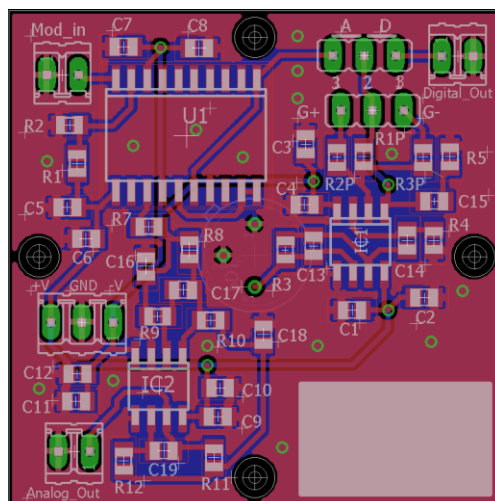


Figura D.7. PCB de la placa R.

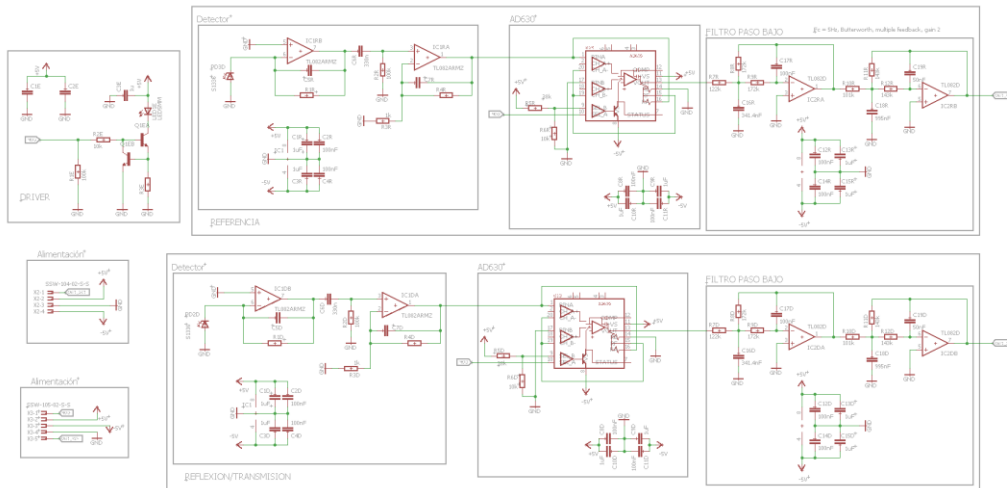


Figura D.8. Visión completa del esquemático de la placa A.

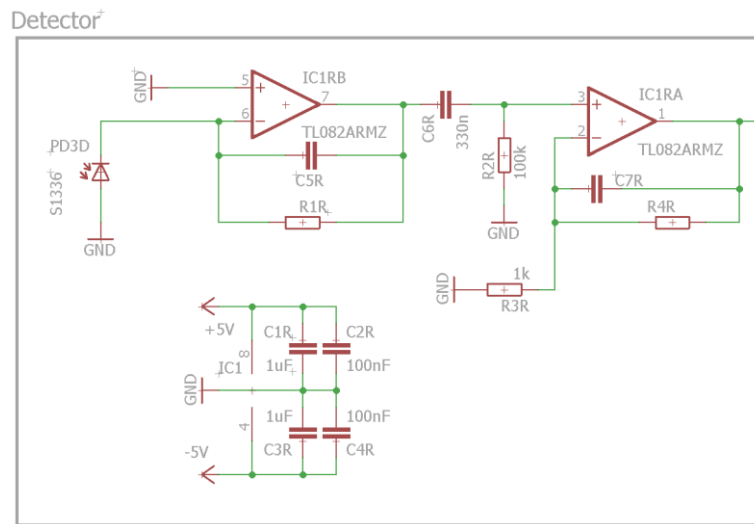


Figura D.9. Bloque detector. Esquemático de la placa A.

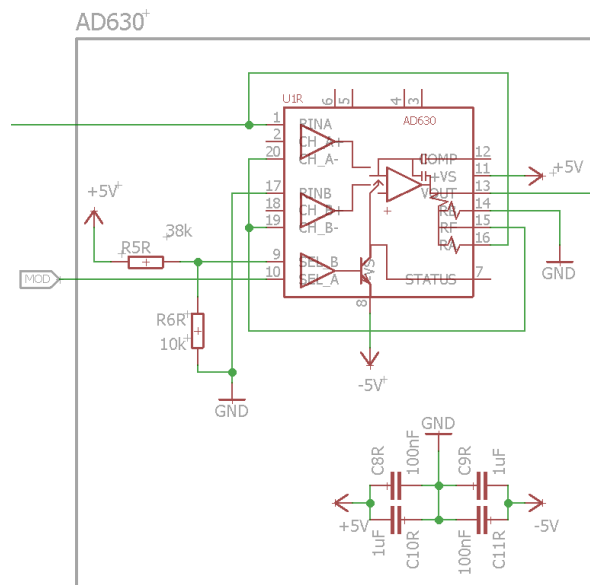


Figura D.10. AD630. Esquemático de la placa A.

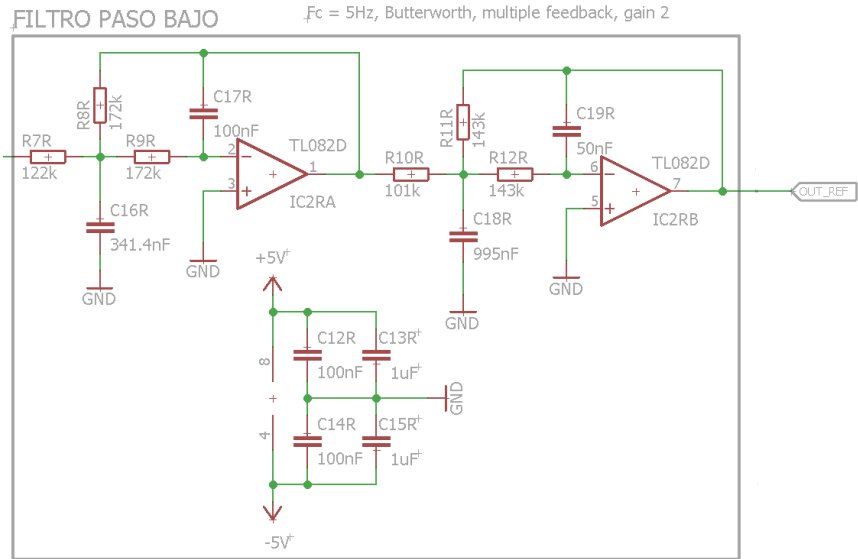


Figura D.11. Filtro paso bajo. Esquemático de la placa A.

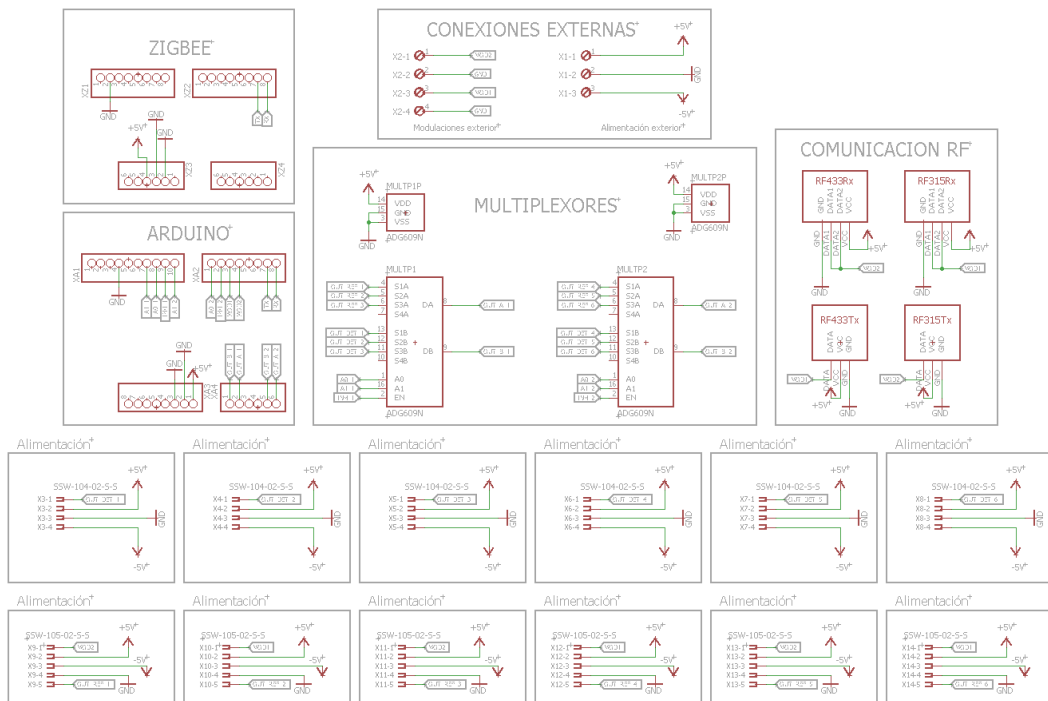


Figura D.12. Esquemático de la placa B.

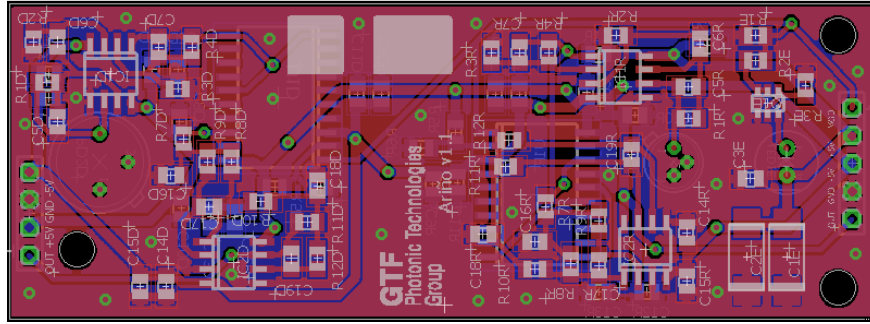


Figura D.13. PCB de la placa A.

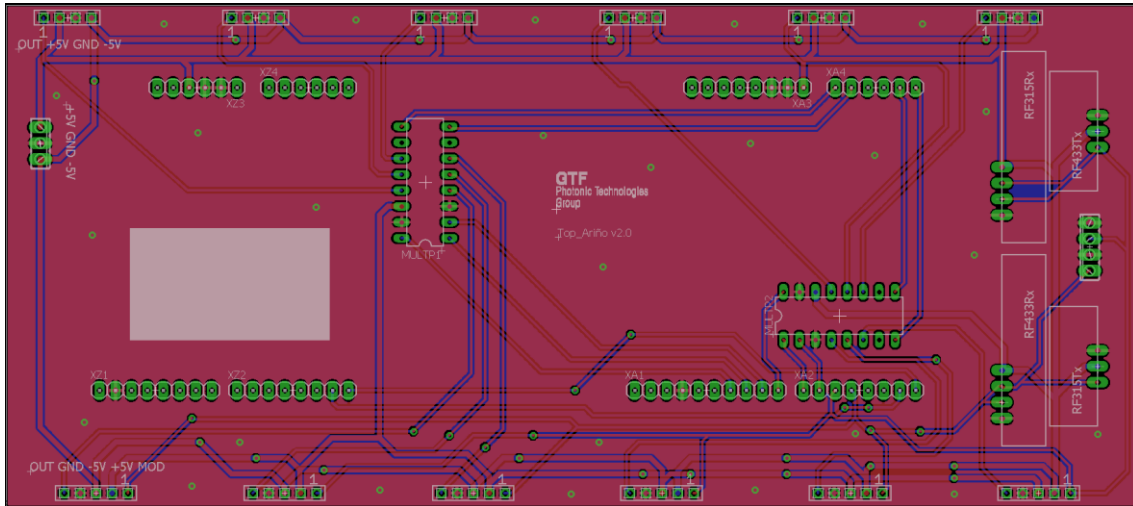


Figura D.14. PCB de la placa B.

Anexo E

Código Arduino

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  pinMode(pinTx_1, OUTPUT); // Salida RF A
  pinMode(pinTx_2, OUTPUT); // Salida RF B
  pinMode(pinMux_A0_1, OUTPUT); // Mux logic control A
  pinMode(pinMux_A1_1, OUTPUT); // Mux logic control A
  pinMode(pinMux_A0_2, OUTPUT); // Mux logic control B
  pinMode(pinMux_A1_2, OUTPUT); // Mux logic control B
  pinMode(pinMux_INH_1, OUTPUT); // Mux enable A
  pinMode(pinMux_INH_2, OUTPUT); // Mux enable B
  pinMode(pinMod_1, OUTPUT); //
  pinMode(pinMod_2, OUTPUT); //

  noInterrupts(); // Desactiva todas las interrupciones

  // Inicialización timer1 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  TCCR1A = 0; //Primero ponemos el pre-escalado a 0
  TCCR1B = 0;

  timerCount1 = (long) 65536.0 - (reloj / 8 / frec1 / 2.0) + 0.5; // 65536 --> 16bit Timer
  if (timerCount1 > 65536)
  {
    timerCount1 = 65536;
  }
  if ( timerCount1 < 0)
  {
    timerCount1 = 0;
  }

  TCNT1 = timerCount1; // Actualiza el valor en el que empieza el contador (65536-16MHz/1/2Hz)
  TCCR1B |= (1 << CS11); // Configuración del pre-escalado
  TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // Activa la interrupcion de overflow del contador

  // Inicialización timer2 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  TCCR2A = 0; //Primero ponemos el pre-escalado a 0
  TCCR2B = 0;

  timerCount2 = (long) 256.0 - (reloj / 256 / frec2 / 2.0) + 0.5; // 256 --> 8bit Timer
  if (timerCount2 > 256)
  {
    timerCount2 = 255;
  }
  if ( timerCount2 < 0)
  {
    timerCount2 = 0;
  }

  TCNT2 = timerCount2; // Actualiza el valor en el que empieza el contador (16MHz/256/2Hz)
  TCCR2B |= (1 << CS22); // Configuración del pre-escalado
  TCCR2B |= (1 << CS21); // Configuración del pre-escalado
  TIMSK2 |= (1 << TOIE2); // Activa la interrupcion de overflow del contador
  /*
  TCCR2B modifica el pre-escaler de la siguiente forma:
  128: el minimo es 243.5Hz (Buena precision) TCCR2B |= (1 << CS20);
  256: el minimo es 122.3Hz TCCR2B |= (1 << CS21);
  1024: el minimo es 30.7Hz (Poca precision) TCCR2B |= (1 << CS21); TCCR2B |= (1 << CS20);
  */

  interrupts(); // Activa todas las interrupciones

  digitalWrite(pinMux_INH_1, HIGH); // Activa el multiplexor A
  digitalWrite(pinMux_INH_2, HIGH); // Activa el multiplexor B
}

ISR(TIMER1_OVF_vect) // Interrupcion activada por overflow del Timer1
{
  bit1 = bit1 ^ 1;
  digitalWrite(pinMod_1, bit1);
  digitalWrite(pinTx_1, bit1); //6.8 microsegundos de delay entre un digitalWrite y otro
  TCNT1 = timerCount1;
}

ISR(TIMER2_OVF_vect) // Interrupcion activada por overflow del Timer2
{
  bit2 = bit2 ^ 1;
  digitalWrite(pinMod_2, bit2);
  digitalWrite(pinTx_2, bit2); //6.8 microsegundos de delay entre un digitalWrite y otro
  TCNT2 = timerCount2;
}

```

Figura E.1. Programación del Arduino para generar 2 frecuencias distintas.

```

void readSerialInput() //Función invocada cuando se recibe algo por el Serial
{
    char input; // Variable temporal para almacenar el último carácter de entrada del buffer
    String str, strNum;
    int num;

    str = Serial.readStringUntil('\n');

    if (str[0] == 'R') //El ordenador pide datos Lockin REFERENCIA + REFLEXIÓN
    {
        if (str[1] == '0') //MODIFICAR EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DEL MODULO
        {
            Serial.println( "R0" + String(ref_1) + "-" + String(ref_2) + "-" + String(ref_3) +
                "-" + String(ref_4) + "-" + String(ref_5) + "-" + String(ref_6) + "-" +
                String(detec_1) + "-" + String(detec_2) + "-" + String(detec_3) + "-" +
                String(detec_4) + "-" + String(detec_5) + "-" + String(detec_6) );
        }
    }

    if (str[0] == 'F') //Pide cambio de frecuencia de modulación
    {
        if (str[1] == '1') //Pide cambio de la primera frecuencia de modulación
        {
            strNum = str.substring( 2, str.length() );
            frec1 = strNum.toInt();

            if (frec1 <= 0)
            {
                Serial.println( "E" ); //Devuelve "Error"
            }
            else
            {
                timerCount1 = (long)65536.0-(reloj/8/frec1/2.0)+0.5; // 16bit Timer-->65536

                if (timerCount1 > 65536)
                {
                    timerCount1 = 65536;
                }
                if ( timerCount1 < 0)
                {
                    timerCount1 = 0;
                }
                Serial.println( "0" ); //Devuelve "Ok"
            }
        }
    }

    if (str[1] == '2') //Pide cambio de de la segunda frecuencia de modulación
    {
        strNum = str.substring( 2, str.length() );
        frec2 = strNum.toInt();

        if (frec2 <= 0)
        {
            Serial.println( "E" ); //Devuelve "Error"
        }
        else
        {
            timerCount2 = (long)256.0-(reloj/256/frec2/2.0)+0.5; // 8bit Timer-->256

            if (timerCount2 > 256)
            {
                timerCount2 = 255;
            }
            if ( timerCount2 < 0)
            {
                timerCount2 = 0;
            }
            Serial.println( "0" ); //Devuelve "Ok"
        }
    }
}
}

```

```

if (str[0] == 'N') //Pide cambio de número de muestras
{
    strNum = str.substring( 1, str.length() );
    numMuestras = strNum.toInt();
    Serial.println( "O" ); //Devuelve "Ok"
}

if (str[0] == 'I') //Pide tipo de Arduino
{
    Serial.println( arduino ); //Devuelve el tipo de configuración del Arduino
}

if (str[0] == 'B') //Pide cambio de BaudRate
{
    strNum = str.substring( 1, str.length() );
    num = strNum.toInt();
    if ( (num == 300) || (num == 600) || (num == 1200) || (num == 2400) || (num == 4800)
        || (num == 9600) || (num == 14400) || (num == 19200) || (num == 28800)
        || (num == 38400) || (num == 57600) || (num == 115200) )
    {
        Serial.flush ();
        Serial.end();
        delay(100);
        Serial.begin(num);
    }
    else
    {
        Serial.println( 'E' ); //Devuelve "Error"
    }
}

if(input == '#') //Testeo de conexión
{
    Serial.println( 'O' ); //Devuelve "Ok"
    return;
}
}

```

Figura E.2. Comunicación Arduino con PC.

Anexo F

Inventario

En este anexo se recoge un listado con todos los componentes necesarios para el ensamblado de los módulos. En el caso de la placa A, se indica el número de componentes por placa, y el total, en el cuál se cuenta que hay 10 bloques, cada uno de ellos con 6 placas en su interior. El mismo caso ocurre con la placa B, ya que se indica el número de componentes por placa, y la cantidad total, teniendo en cuenta que hay 10 bloques, y en cada uno de ellos se implementa una única placa.

Los diodos LED utilizados se indican en la Tabla F.1, siendo todos ellos de la marca Roithner Lasertechnik GmbH.

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
Modelo	VL415-5-15	RLS-B465	LED515-10-30	LED570-06	B5-435-TL	LED680-02AU
Longitud de onda	415nm	465nm	515nm	570nm	625nm	680nm

Tabla F.1. Listado de los diodos LED utilizados.

PLACA A

ETIQUETA COMPONENTE	TIPO	VALOR	ENCAPSULADO	CÓDIGO FARNELL	CANTIDAD POR PLACA	CANTIDAD TOTAL
C1E, C2E	Condensador	220uF	C6032_MM	1462420	2	60
C1D, C1R, C3D, C3E, C3R, C9D, C9R, C10D, C10R, C13R, C13D, C15D, C15R, C18D, C18R	Condensador	1uF	C0805	2496996	22	660
C2D, C2R, C4D, C4R, C8D, C8R, C11D, C11R, C12D, C12R, C14D, C14R, C17D, C17R	Condensador	100nF	C0805	2496944	21	630
C5D, C5R, C7D, C7R	Condensador	10pF	C0805	2497007	6	180
C6D, C6R, C16D, C16R	Condensador	330nF	C0805	2497002	6	180
C19D, C19R	Condensador	47nF	C0805	2496983	3	90
R1D, R1R	Resistencia	Dependiente de la ganancia requerida por cada LED	R0805	---	3	90
R1E, R2D, R2R, R10D, R10R	Resistencia	100K	R0805	2447551	7	210
R2E, R6D, R6R	Resistencia	10K	R0805	2447553	4	120
R3E	Resistencia	10	R0805	9332421	1	30
R3D, R3R	Resistencia	1K	R0805	9332383	3	90
R4D, R4D	Resistencia	Dependiente de la ganancia requerida por cada LED	R0805	---	3	90
R5D, R5R	Resistencia	39K	R0805	9333177	3	90
R7D, R7R	Resistencia	120K	R0805	2141961	3	90
R8D, R8R, R9D, R9R	Resistencia	170K	R0805	2141977	6	180
R11D, R11R, R12D, R12R	Resistencia	140K	R0805	2447629	6	180
IC1D, IC1R, IC2D, IC2R	Amplificador Operacional AD822ARZ	---	SOIC8	9994351	6	180
Q1E	Transistor BCM847	---	SOT-363	1757902	1	30
U1D, U1R	AD630	---	WSOIC20	2377022	3	90
LED1E	LED 5mm	---	---	---	1	30
PD2D	Fotodiodo S1336	---	TO18	---	1	30
PD3D	Fotodiodo S1336	---	TO05	---	2	60
X2	Conector Macho	4 pines	---	9731091	2	60
X3	Conector Macho	5 pines	---	9731105	2	60

PLACA B

ETIQUETA COMPONENTE	TIPO	VALOR	ENCAPSULADO	CÓDIGO FARNELL	CANTIDAD POR PLACA	CANTIDAD TOTAL
X3, X4, X5, X6, X7, X8	Conector Hembra	4 pines	---	1593460	6	60
X9, X10, X11, X12, X13, X14	Conector Hembra	5 pines	---	1593461	6	60
X1	Conector Macho	3 pines	---	1675765	1	10
X2	Conector Macho	4 pines	---	1675755	1	10
X1	Conector Carcasa	3 pines	---	1675766	1	10
X2	Conector Carcasa	4 pines	---	1675756	1	10
XA1, XA2, XA3, XA4, XZ1, XZ2, XZ3, XZ4	Conector Macho	32 pines	---	5217817	2	20
MULTP1, MULTP2	Multiplexor ADG774BRZ	---	SOIC16	9425799	2	20
---	Arduino UNO	---	---	---	1	10
---	Módulo ZigBee Nodo	---	---	---	1	10
---	Módulo ZigBee Coordinador	---	---	---	1	1
---	Módulo RF Tx (433MHz)	---	---	---	1	10
---	Módulo RF Rx (433MHz)	---	---	---	1	10
---	Módulo RF Tx (315MHz)	---	---	---	1	10
---	Módulo RF Rx (315MHz)	---	---	---	1	10

Anexo G

Datasheets

FEATURES

Recovers signal from 100 dB noise
 2 MHz channel bandwidth
 45 V/ μ s slew rate
 Low crosstalk: -120 dB at 1 kHz, -100 dB at 10 kHz
 Pin programmable, closed-loop gains of ± 1 and ± 2
 0.05% closed-loop gain accuracy and match
 100 μ V channel offset voltage (AD630)
 350 kHz full power bandwidth
 Chips available

APPLICATIONS

Balanced modulation and demodulation
 Synchronous detection
 Phase detection
 Quadrature detection
 Phase sensitive detection
 Lock in amplification
 Square wave multiplication

GENERAL DESCRIPTION

The AD630 is a high precision balanced modulator/demodulator that combines a flexible commutating architecture with the accuracy and temperature stability afforded by laser wafer trimmed thin film resistors. A network of on-board applications resistors provides precision closed-loop gains of ± 1 and ± 2 with 0.05% accuracy (AD630B). These resistors may also be used to accurately configure multiplexer gains of 1, 2, 3, or 4. External feedback enables high gain or complex switched feedback topologies.

The AD630 can be thought of as a precision op amp with two independent differential input stages and a precision comparator that is used to select the active front end. The rapid response time of this comparator coupled with the high slew rate and fast settling of the linear amplifiers minimize switching distortion.

The AD630 is used in precision signal processing and instrumentation applications that require wide dynamic range. When used as a synchronous demodulator in a lock-in amplifier configuration, the AD630 can recover a small signal from 100 dB of interfering noise (see the Lock-In Amplifier Applications section). Although optimized for operation up to 1 kHz, the circuit is useful at frequencies up to several hundred kilohertz.

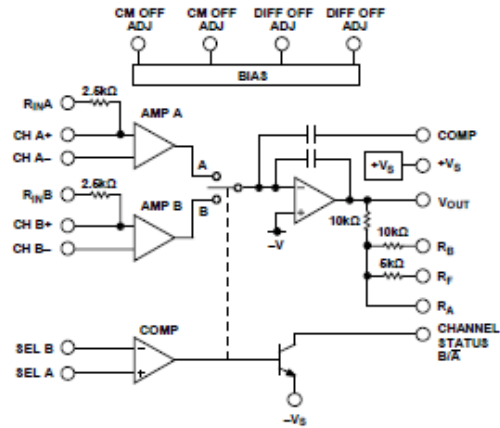
FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM


Figure 1.

Other features of the AD630 include pin programmable frequency compensation; optional input bias current compensation resistors, common-mode and differential-offset voltage adjustment, and a channel status output that indicates which of the two differential inputs is active.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The application flexibility of the AD630 makes it the best choice for applications that require precisely fixed gain, switched gain, multiplexing, integrating-switching functions, and high speed precision amplification.
2. The 100 dB dynamic range of the AD630 exceeds that of any hybrid or IC balanced modulator/demodulator and is comparable to that of costly signal processing instruments.
3. The op amp format of the AD630 ensures easy implementation of high gain or complex switched feedback functions. The application resistors facilitate the implementation of most common applications with no additional parts.
4. The AD630 can be used as a 2-channel multiplexer with gains of 1, 2, 3, or 4. The channel separation of 100 dB at 10 kHz approaches the limit achievable with an empty IC package.
5. Laser trimming of the comparator and amplifying channel offsets eliminate the need for external nulling in most cases.

Rev. F

[Document Feedback](#)

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781.329.4700 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
 Technical Support www.analog.com

LOCK-IN AMPLIFIER APPLICATIONS

Lock-in amplification is a technique used to separate a small, narrow-band signal from interfering noise. The lock-in amplifier acts as a detector and narrow-band filter combined. Very small signals can be detected in the presence of large amounts of uncorrelated noise when the frequency and phase of the desired signal are known.

The lock-in amplifier is basically a synchronous demodulator followed by a low-pass filter. An important measure of performance in a lock-in amplifier is the dynamic range of its demodulator. The schematic diagram of a demonstration circuit which exhibits the dynamic range of an AD630 as it might be used in a lock-in amplifier is shown in Figure 35. Figure 34 is an oscilloscope photo demonstrating the large dynamic range of the AD630. The photo shows the recovery of a signal modulated at 400 Hz from a noise signal approximately 100,000 times larger.

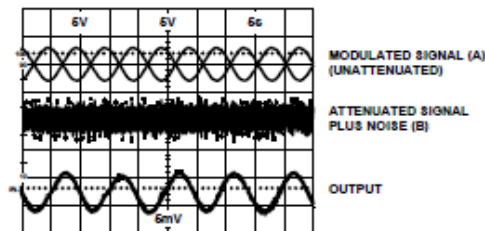


Figure 34. Lock-In Amplifier Waveforms

The test signal is produced by modulating a 400 Hz carrier with a 0.1 Hz sine wave. The signals produced, for example, by chopped radiation (that is, IR, optical) detectors may have similar low frequency components. A sinusoidal modulation is used for clarity of illustration. This signal is produced by a circuit similar to Figure 28 and is shown in the upper trace of Figure 34. It is attenuated 100,000 times normalized to the output, B, of the summing amplifier. A noise signal that might represent, for example, background and detector noise in the chopped radiation case, is added to the modulated signal by the summing amplifier. This signal is simply band limited, clipped white noise. Figure 34 shows the sum of attenuated signal plus noise in the center trace. This combined signal is demodulated synchronously using phase information derived from the modulator, and the result is low-pass filtered using a 2-pole simple filter which also provides a gain of 100 to the output. This recovered signal is the lower trace of Figure 34.

The combined modulated signal and interfering noise used for this illustration is similar to the signals often requiring a lock-in amplifier for detection. The precision input performance of the AD630 provides more than 100 dB of signal range and its dynamic response permits it to be used with carrier frequencies more than two orders of magnitude higher than in this example. A more sophisticated low-pass output filter aids in rejecting wider bandwidth interference.

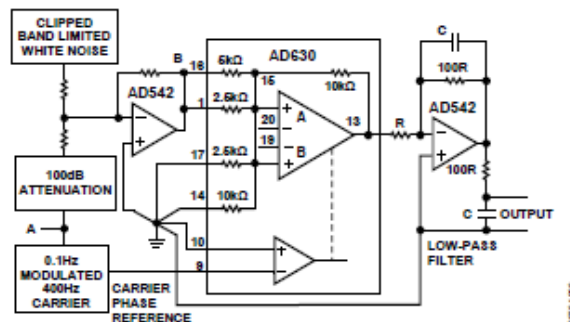
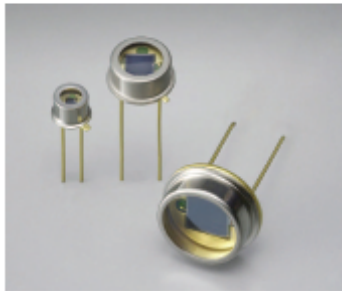


Figure 35. Lock-In Amplifier



Si photodiodes

S1336 series

UV to near IR for precision photometry

These Si photodiodes have sensitivity in the UV to near IR range. They are suitable for low-light-level detection in analysis and the like.

Features

- High sensitivity in UV range
- Low capacitance
- High reliability

Applications

- Analytical instruments
- Optical measurement equipment

Structure / Absolute maximum ratings

Type no.	Dimensional outline/ Window material*1	Package	Photosensitive area size (mm)	Absolute maximum ratings			
				Reverse voltage V _R max (V)	Operating temperature T _{opr} (°C)	Storage temperature T _{stg} (°C)	
S1336-18BQ*2	(1)/Q	TO-18	1.1 × 1.1	5	-20 to +60	-55 to +80	
S1336-18BK	(2)/K				-40 to +100	-55 to +125	
S1336-5BQ*2	(3)/Q	TO-5	2.4 × 2.4		-20 to +60	-55 to +80	
S1336-5BK	(4)/K				-40 to +100	-55 to +125	
S1336-44BQ*2	(5)/Q				3.6 × 3.6	-20 to +60	-55 to +80
S1336-44BK	(6)/K					-40 to +100	-55 to +125
S1336-8BQ*2	(7)/Q	TO-8	5.8 × 5.8		-20 to +60	-55 to +80	
S1336-8BK	(8)/K				-40 to +100	-55 to +125	

*1: Window material K=borosilicate glass, Q=quartz glass

*2: Refer to "Precautions against UV light exposure."

Note: Exceeding the absolute maximum ratings even momentarily may cause a drop in product quality. Always be sure to use the product within the absolute maximum ratings.

Electrical and optical characteristics (Typ. T_a=25 °C, unless otherwise noted)

Type no.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ _p (nm)	Photosensitivity S (A/W)			Short circuit current I _{sc} 100 lx (μA)	Dark current I _D V _R =10 mV max. (pA)	Temp. coefficient of I _D T ₂₀ (times/°C)	Rise time t _r V _R =0 V R _L =1 kΩ (μs)	Terminal capacitance C _t V _R =0 V f=10 kHz (pF)	Shunt resistance R _{sh} V _R =10 mV		Noise equivalent power NEP (W/Hz ^{1/2})							
			λ _p	200 nm							Min. (μA)	Typ. (μA)		Min. (GΩ)	Typ. (GΩ)					
				Min.	Typ.											He-Ne laser 633 nm				
S1336-18BQ	190 to 1100	960	0.5	0.10	0.12	0.33	1	1.2	20	1.15	0.1	20	0.5	2	5.7 × 10 ⁻¹⁵					
S1336-18BK	320 to 1100															-	-	0.9	1.0	
S1336-5BQ	190 to 1100															0.10	0.12	4	5	30
S1336-5BK	320 to 1100															-	-	8	10	50
S1336-44BQ	190 to 1100															0.10	0.12	22	28	100
S1336-44BK	320 to 1100															-	-	-	-	-
S1336-8BQ	190 to 1100															0.10	0.12	-	-	-
S1336-8BK	320 to 1100															-	-	-	-	-