



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS



PROTOTIPO DE ESPECTRÓMETRO COMPACTO AJUSTABLE

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

I.F. ESDRAS TERRANOVA AZUARA JUÁREZ

ASESOR:

DR. LUIS FELIPE LASTRAS MARTÍNEZ

FEBRERO 2018

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P., MÉXICO

Título:

PROTOTIPO DE ESPECTRÓMETRO COMPACTO AJUSTABLE

Nombre del estudiante:

I.F. Esdras Terranova Azuara Juárez.

Comité que acepta la tesis:

Dr. Luis Felipe Lastras Martínez. (Asesor)

\_\_\_\_\_

Dra. Marcela Mejía Carlos. (Sinodal)

\_\_\_\_\_

Dr. Jorge Ortega Gallegos. (Sinodal)

\_\_\_\_\_

Dr. Raúl Eduardo Balderas Navarro. (Sinodal)

\_\_\_\_\_

# Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud hacia el personal de la UASLP, la Facultad de Ciencias y el IICO por ser los pilares de las instituciones que me brindaron todas las facilidades durante mi desarrollo profesional. Al CONACYT por otorgar el apoyo económico para mi formación de maestría. A mi asesor el Dr. Luis Felipe Lastras Martínez que me permitió colaborar con él en este proyecto y me ofreció sus certeras observaciones. A mis profesores y compañeros de generación. A mi familia, en especial a mi madre. Y a mis amigos que me han acompañado durante todos estos años.

# Resumen

Se describe el diseño óptico y electrónico de un espectrómetro compacto ajustable, con un rango desde 333.1 a 660.5 nm, una resolución espectral de 3.3 nm y 1348 pixeles efectivos. El instrumento controla una cámara lineal cuya señal es digitalizada, a través de un convertidor analógico a digital de 12 bits, la información espectral es enviada por medio de comunicación USB a un ordenador personal, para ser procesada, analizada y visualizada por el usuario, además de que la operación del espectrómetro es controlada desde el ordenador.

# Índice

Introducción .....	1
Objetivo.....	4
1. Diseño .....	5
1.1. Introducción .....	5
1.2. Cable M93L01 .....	6
1.2.1. Thorlabs M93L01.....	7
1.3. Rendija de entrada.....	8
1.4. Espejo colimador.....	9
1.4.1. Espejo esférico Edmund Optics #43-537 .....	9
1.5. Rejilla de difracción .....	10
1.5.1. Rejilla de difracción holográfica Edmund Optics #43-772.....	11
1.6. Espejo de enfoque .....	13
1.6.1. Espejo de enfoque Edmund Optics #43-535 .....	14
1.7. Detector CCD.....	14
1.7.1. CCD TOSHIBA TCD1304DG.....	15
1.7.2. Señales de control del TCD1304DG .....	17
1.8. Módulo PL2303 Conversor USB a TTL .....	18
1.9. DE0-Nano .....	18
1.10. ADC .....	19
1.11. Quartus II. ....	19
1.12. LabVIEW .....	20
2. Desarrollo del espectrómetro .....	21
2.1. Arreglo Electrónico.....	21
2.2. Programación en Quartus II. ....	22
2.2.1. Frecuencias de funcionamiento .....	24
2.2.2. Bloque ControlCCD.....	24
2.2.3. Bloque ADC.....	25
2.2.4. Bloque Transmisor .....	25
2.2.5. Bloque Receptor.....	26
2.3. Instrumento Virtual Espectro .....	26
2.4. Instrumento Virtual Reconstrucción decimal.....	31

2.5. Instrumento Virtual Analizador de espectros .....	33
2.6. Banco óptico.....	34
2.6.1. Calibración .....	37
2.7. UVP Pen-ray 90001201 .....	38
2.8. Láseres.....	39
2.9. LEDs .....	41
2.10. Resolución espectral.....	42
2.11. Señales de control.....	45
2.12. Comparación con el espectrómetro USB4000 de Ocean Optics .....	46
Conclusiones .....	47
Recomendaciones.....	47
Bibliografía .....	48
Anexos.....	50
A. Código del bloque ControlCCD .....	50
B. Código del bloque ADC .....	51
C. Código del bloque Transmisor .....	53
D. Código del bloque Receptor .....	55
E. Información del fabricante de la UVP Pen-ray 90001201 .....	58

# Introducción

Un objeto a cualquier temperatura emite ondas electromagnéticas en la forma de radiación. Las características de esta radiación dependen de la temperatura y de las propiedades de la superficie del objeto. Estudios cuidadosos muestran que la radiación consiste en una distribución de longitudes de onda continuas desde todas las partes del espectro electromagnético. Si el objeto se encuentra a temperatura ambiente, la radiación térmica tendrá longitudes de onda principalmente en la región infrarroja y, por esto, no podrá ser detectada a simple vista. Conforme aumenta la temperatura superficial del objeto, llegará un momento en que éste comenzará a resplandecer con un color rojo visible. A temperaturas suficientemente altas, el objeto resplandeciente parece blanco, como en el caso del filamento caliente de tungsteno de un foco. Todos los objetos emiten una radiación térmica, caracterizada por una distribución continua de longitudes de onda. En marcado contraste con este espectro de distribución continua, está el espectro de línea discreto que se observa cuando un gas a baja presión se somete a una descarga eléctrica. (La descarga eléctrica se presenta cuando el gas es sometido a una diferencia de potencial que produce un campo eléctrico mayor que la resistencia dieléctrica del gas.) La observación y el análisis de estas líneas espectrales se conocen como espectroscopia de emisión. Cuando se examina la luz de una descarga de gas con un espectrómetro, es posible ver que está constituida por algunas líneas brillantes de color sobre un fondo por lo general oscuro. Este espectro de línea discreto difiere en gran medida del arco iris continuo de colores observado cuando se examina un sólido resplandeciente con el mismo instrumento. La figura 1 muestra que las longitudes de onda contenidas en un espectro de línea particular son características del elemento que emite la luz. El espectro de línea más simple, que se describe con detalle, es el del átomo de hidrógeno. Porque que no hay dos elementos que tengan el mismo espectro de línea este fenómeno es una técnica práctica y sensible para identificar los elementos que están presentes en muestras desconocidas. Otra forma de la espectroscopia, muy útil para analizar sustancias, es la espectroscopia de absorción. Un espectro de absorción se obtiene al pasar una luz blanca de una fuente continua a través de un gas o una solución diluida del elemento que se está analizando. Un espectro de absorción está constituido por una serie de líneas oscuras sobre puestas al espectro continuo de la fuente de luz, como se muestra en la figura 2 para el hidrógeno atómico [1].

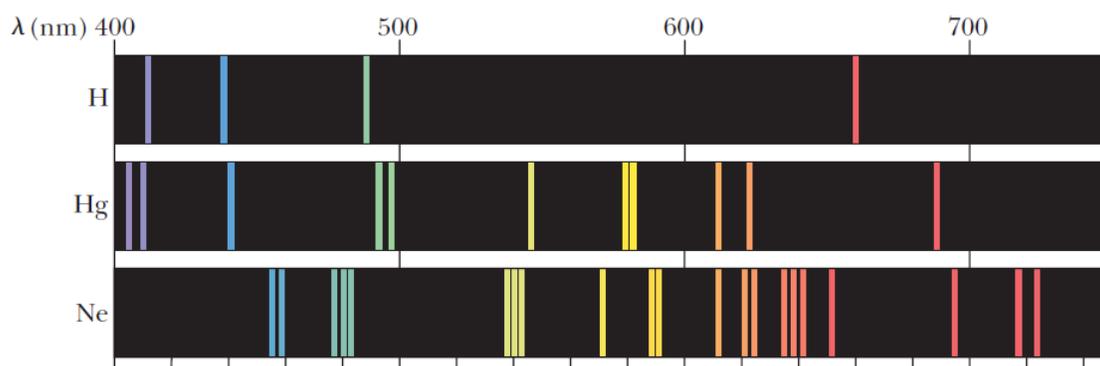


Fig. 1. Espectros de líneas de emisión para el hidrógeno, el mercurio y el neón. [1].

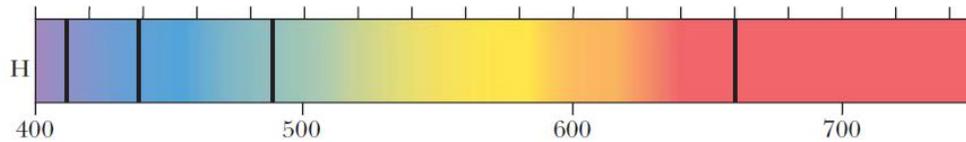


Fig. 2. Espectro de absorción del hidrógeno. Observe que la líneas oscuras de absorción se presentan en las mismas longitudes de onda que las líneas de emisión del hidrógeno en la figura 2 [1].

La espectroscopia es el estudio de la absorción y emisión de luz y otra radiación por la materia, y su relación a la dependencia de estos procesos por la longitud de onda de la radiación [2]. Uno de los instrumentos que ha facilitado el desarrollo de este campo es el espectrómetro, dispositivo para detectar y analizar las longitudes de onda de radiación electromagnética [3]. Se podría decir que el antecesor del espectrómetro fue el espectroscopio, su diferencia radica en que el espectrómetro utiliza algún tipo de sensor electrónico para detectar la luz, mientras que el espectroscopio utiliza el ojo humano. El inventor del espectroscopio fue el físico Joseph von Fraunhofer en 1814, a través de su invención logró observar unas líneas oscuras (ahora llamadas líneas de Fraunhofer) en el espectro solar, como se puede observar en la figura 3, pero no fue sino hasta que Gustav R. Kirchhoff y Robert Bunsen mostraron que una de esas bandas oscuras en el espectro de emisión del Sol corresponde exactamente a la banda de emisión amarilla obtenida cuando vapor de sodio es calentando a la flama. Esto llevo a Kirchhoff a deducir que las líneas de Fraunhofer en el espectro solar eran líneas de absorción de elementos cuyo espectro de emisión a la flama tendrían líneas exactamente en la misma posición en el espectro. Su trabajo permitió a Kirchooff el desarrollar la relación fundamental entre espectros de emisión y absorción: cualquier especie que puede ser excitada para emitir radiación a una longitud de onda particular también absorberá radiación a esa longitud de onda. Así, Kirchhoff no solamente puso los cimientos de métodos de absorción atómica de análisis químico sino también dio un sorprendente ejemplo de su poder. En efecto, es difícil imaginar una más convincente y dramática demostración. Lo anterior abrió la puerta a una gran gama de aplicaciones como, medición de elementos traza en muestras biomédicas, análisis de materiales usados en componentes electrónicos, determinación de concentraciones de elementos en estudios ambientales y agrícolas, determinar la calidad de alimentos, análisis geoquímicos y de mineralogía, monitoreo en la fabricación de fármacos, por mencionar unos ejemplos [4].

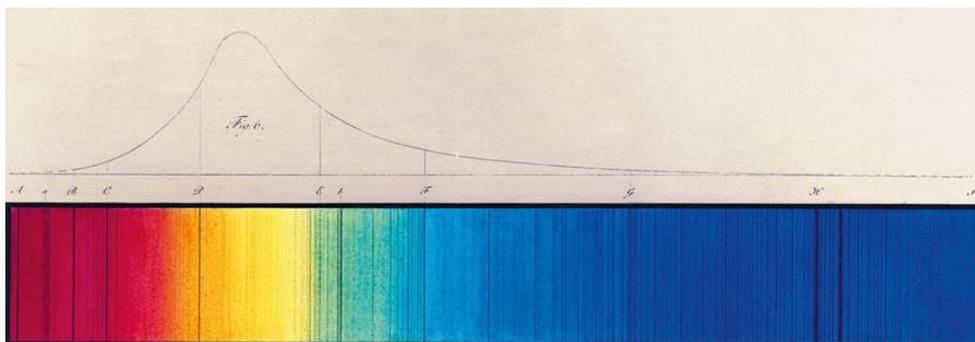


Fig. 3. Espectro solar [5].

El primer espectroscopio consistía en un prisma que separaba la luz blanca en sus diversas longitudes de onda, un teodolito y el ojo humano como sensor, observe la figura 4. Actualmente, en el espectrómetro moderno el trabajo de dispersar la luz blanca en sus constituyentes se hace a través de una rejilla de difracción, y una cámara CCD (Charged Couple Device) lineal reemplaza al ojo.



Fig. 4. Joseph von Fraunhofer realizando una demostración de su espectroscopio [5].

En 1994 la empresa norteamericana Ocean Optics lanzó al mercado el primer espectrómetro comercial en miniatura, el modelo S1000-E. Este se insertaba en una ranura de una computadora personal, utilizaba un detector CCD lineal y su resolución espectral era de 0.7 nm. Una importante ventaja de este fue la desaparición de partes móviles, Todo el rango espectral era capturado al mismo tiempo por el detector de arreglo lineal, cuyas celdas constituían el plano focal del espectrómetro. Desde entonces, los espectrómetros comerciales en miniatura han experimentado una mejora en la resolución espectral, una miniaturización física y desaparición de partes móviles. La figura 5 muestra la evolución de los espectrómetros según su resolución, desde 1991 hasta al año 2005. La mejora en resolución esta dictada por el desarrollo de los detectores, en particular por el tamaño mínimo de las celdas del arreglo, ya que en la práctica, la imagen de la rendija de entrada del banco óptico se debe proyectar sobre dicha celda [6].

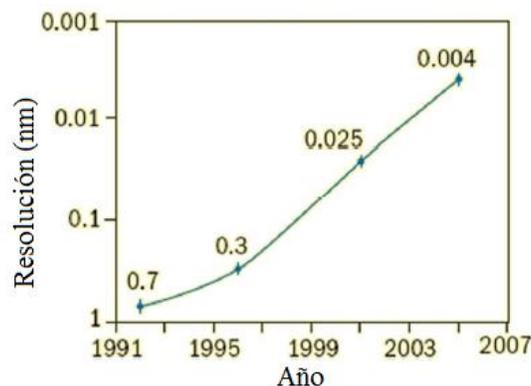


Fig. 5. Evolución de los espectrómetros miniatura [6].

## Objetivo

El objetivo de la presente tesis es construir el prototipo espectrómetro que cumpla con las siguientes características:

1. Que sea de pequeñas dimensiones (compacto), para aplicaciones que requieran portabilidad.
2. Resolución espectral igual o mejor a la comercial.
3. Que el diseño pueda ajustarse para utilizarse para diferentes regiones del espectro óptico (ultravioleta, visible e infrarrojo).
4. La más rápida adquisición de espectros posible.
5. Comunicación USB.
6. Sea controlado a través de una interfaz de usuario en una computadora personal.

Para lograr lo anterior tomamos como referencia lo que ya se encuentra disponible de forma comercial, tratando de imitar en la medida de lo posible las guías de diseño que se observan en los espectrómetros miniatura ofrecidos por diversas empresas en el mercado.

La motivación de construir un espectrómetro con las especificaciones listadas, es el tener un instrumento al cual se le puedan hacer pequeñas modificaciones para optimizarlo en diversas aplicaciones. No existe un espectrómetro universal que resuelva todas las necesidades de espectrometría, es por eso que comercialmente se ofrece una gama de espectrómetros que se encuentran diseñados para un conjunto finito de requerimientos, sin embargo muchas de las veces un banco óptico de un espectrómetro diseñado para hacer mediciones en la región ultravioleta del espectro, también puede utilizarse para hacer mediciones en la región visible si se hacen las adecuaciones necesarias, sin tener que diseñar un banco óptico completamente nuevo. Esto se traduce a un ahorro económico en cuanto al no tener que invertir en múltiples espectrómetros para cada problema, si se dispone de un espectrómetro flexible el cual al mover mínimamente la orientación de sus componentes, o el intercambiar alguno de sus elementos pueda resolver una u otra problemática.

# 1. Diseño

## 1.1. Introducción

La estructura de un espectrómetro moderno puede ser muy variada dependiendo de las aplicaciones que pueda realizar, desde tener o no partes móviles, poseer un solo detector electrónico o un arreglo de los mismos, usar un prisma o una rejilla, etc. Para tener una idea general del espectrómetro que se buscó realizar con en el presente trabajo, utilizamos como referencia el banco óptico del espectrómetro de Ocean Optics el USB4000 que se muestra en la figura 6, y cuyas partes son descritas a continuación:

1. Conector SMA 905: la luz que se busca analizar es guiada por medio de un cable de fibra, entra por un extremo, y sale por el otro que se encuentra sujetado al conector SMA 905, de esta forma ingresa al espectrómetro. Un parámetro importante del cable es su apertura numérica, el cual determina su capacidad para captar luz.
2. Rendija de entrada fija: la rendija es crítica para el funcionamiento del espectrómetro, determina la cantidad de luz que entra al banco óptico, y es parcialmente responsable de determinar la resolución espectral del sistema.
3. Espejo colimador: el espejo debe empatar la apertura numérica de la fibra para capturar toda la luz. La luz se refleja en el espejo como un haz colimado hacia la rejilla de difracción.
4. Rejilla de difracción: descompone la luz en sus diversas longitudes de ondas por las que se constituye. Determina el rango de longitudes de ondas y parcialmente la resolución óptica que se puede obtener.
5. Espejo de enfoque: este espejo enfoca sobre el plano del detector el espectro de primer orden proveniente de la rejilla de difracción.
6. Detector: un detector de arreglo lineal CCD de 3648 elementos (Toshiba TCD1304AP), con un rango efectivo de 200 a 1100 nm. Cada pixel responde a la longitud de onda con la que entra en contacto.
7. Puerto USB: el espectrómetro requiere de una fuente de poder para hacer funcionar la electrónica del mismo, además de un canal de comunicación para enviar la información espectral hacia un ordenador personal, esto lo logra a través del puerto USB.

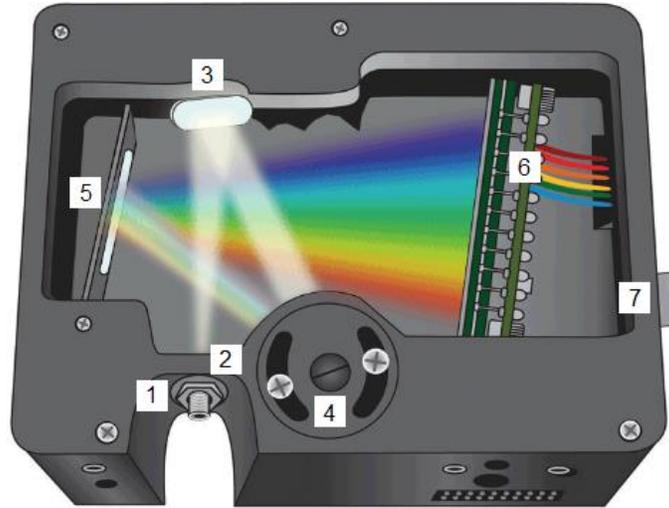


Fig. 6. Banco óptico del espectrómetro USB4000 [7].

En orden de estructurar la información necesaria para explicar el funcionamiento del espectrómetro, se ha elegido seguir la secuencia de procesos que se llevan a cabo en este, iniciando desde la entrada de luz por el cable, siguiendo su camino por los elementos ópticos, después la generación de una señal en el detector por parte de la luz, hasta la digitalización y transmisión de dicha señal.

### 1.2. Cable M93L01

El cable (compuesto de varias fibras ópticas) nos permite guiar la luz hasta el espectrómetro, se fija su posición por medio de un Conector SMA 905, de esta forma garantizamos que la luz siga siempre la misma trayectoria al inicio del banco óptico.

Las fibras ópticas son parte de una más amplia clase de componentes ópticas conocidas como guías de onda, que utilizan la reflexión total interna para poder confinar y guiar luz dentro de una estructura sólida o líquida. Las fibras ópticas, en particular, son usadas en numerosas aplicaciones; ejemplos comunes incluyen telecomunicaciones, espectroscopia, iluminación y sensores.

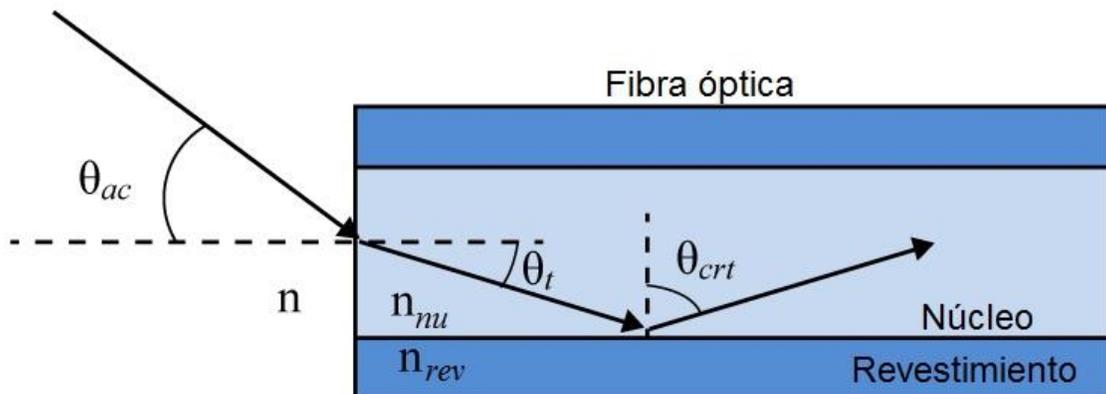


Fig. 7. Fibra óptica de índice escalonado [8].

Una de las de las fibras ópticas de vidrio más comunes usa una estructura conocido como fibra de índice escalonado, la cual es mostrada en la figura 7. Fibras de índice escalonado tienen núcleo interior hecho de un material con un índice de refracción que es mayor que el de la capa de revestimiento que le rodea. Dentro de la fibra, un ángulo crítico de incidencia existe tal que la luz se reflejará fuera de la interfaz núcleo/revestimiento en vez de refractarse hacia el medio que le rodea. Para cumplir las condiciones de reflexión total interna en la fibra, el ángulo de la luz lanzada dentro de la fibra debe ser menor que un cierto ángulo, el cual es definido como el ángulo de aceptación,  $\theta_{ac}$ . La ley de Snell puede ser usada para calcular este ángulo:

$$\text{sen } \theta_{crt} = \frac{n_{rev}}{n_{nu}} = \cos \theta_t \quad (Ec.1)$$

$$n \text{ sen } \theta_{ac} = n_{nu} \sqrt{1 - (\cos \theta_t)^2} = \sqrt{n_{nu}^2 - n_{rev}^2} \quad (Ec.2)$$

Donde  $n_{nu}$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra,  $n_{rev}$  es el índice de refracción del revestimiento de la fibra,  $n$  es el índice de refracción del medio exterior,  $\theta_{crt}$  es el ángulo crítico, y  $\theta_{ac}$  es el ángulo medio de aceptación de la fibra. La apertura numérica ( $NA$ ) es una cantidad adimensional usada por manufactureros de fibra para especificar el ángulo de aceptación de una fibra óptica y está definida como [8]:

$$NA = n \text{ sen } \theta_{ac} = \sqrt{n_{nu}^2 - n_{rev}^2} \quad (Ec.3)$$

Los sistemas ópticos como los objetivos de las cámaras fotográficas o de microscopios son caracterizados por su ( $NA$ ), así como por su número  $\#f$ . Este último se define como:

$$\#f = \frac{1}{2NA} \quad (Ec.4)$$

Tanto la apertura numérica ( $NA$ ) como el número  $\#f$ , son parámetros que caracterizan la capacidad del sistema e cuestión para capturar la luz. Su conocimiento permite optimizar el acople de un instrumento óptico con la fuente de luz bajo estudio, así como el acople entre las diferentes partes ópticas del propio instrumento [6].

### 1.2.1. Thorlabs M93L01

El M93L01 (figura 8) es un cable de conexión de fibra que tiene las siguientes características:

- Diámetro de núcleo de 1500 $\mu$ m
- Apertura numérica de 0.39
- Rango de longitudes de onda de 300nm a 1200nm
- Alto-OH
- Conector SMA 905 en ambos extremos
- Un entubado de acero inoxidable con un diámetro de 5mm
- Largo de 1m

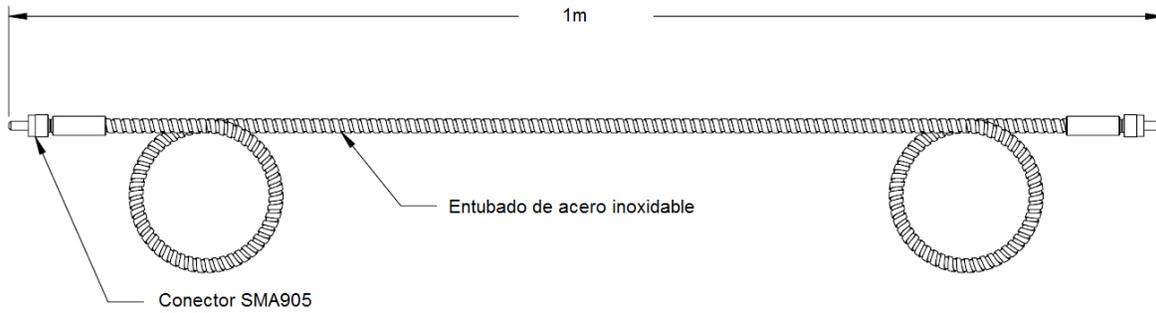


Fig. 8. Diagrama del M93L01 [9].

### 1.3. Rendija de entrada

La función de la rendija de entrada es el definir un objeto nítido para el banco óptico. El tamaño (ancho  $A_r$ ) de la rendija de entrada es uno de los principales factores que afecta el rendimiento del espectrómetro. El ancho de la imagen de la rendija de entrada es un factor clave en la determinación de la resolución del espectrómetro cuando es mayor que el ancho del pixel del arreglo detector. Las más comunes rendijas usadas en espectrómetros son 10, 25, 50, 100, y 200 $\mu\text{m}$  [10].

Una de las más importantes características de un espectrómetro es la resolución espectral u óptica. La resolución espectral de un sistema determina el máximo número de picos espectrales que un espectrómetro puede resolver. Por ejemplo, si un espectrómetro con un rango de longitud de onda de 200 nm tiene una resolución espectral de 1nm, el sistema sería capaz de resolver un máximo de 200 longitudes de onda individuales (picos) en todo el espectro. En los espectrómetros, hay 3 principales factores que determinan la resolución espectral: la rendija, la rejilla de difracción, y el detector. La rendija determina la el mínimo tamaño de imagen que el banco óptico puede formar en el plano del detector. La rejilla de difracción determina el rango total de longitudes de onda del espectrómetro. El detector determina el máximo número y tamaño de puntos discretos en el que el espectro puede ser digitalizado.

Cuando se calcula la resolución espectral ( $\delta\lambda$ ) de un espectrómetro, hay cuatro valores que se deben conocer: el ancho de rendija ( $A_r$ ), el rango espectral del espectrómetro ( $\Delta\lambda$ ), el ancho de pixel ( $A_p$ ), y el número de pixeles en el detector ( $n$ ). Es también importante recordad que la resolución espectral está definida como la anchura a media altura, abreviada FWHM (del inglés Full Width at Half Maximum). Una muy común equivocación que se pasa por alto al calcular la resolución espectral es el hecho de que para poder determinar el FWHM de un pico, un mínimo de tres pixeles son requeridos, por lo tanto la resolución espectral (asumiendo que  $A_r = A_p$ ) es iguala tres veces la resolución de pixel ( $\Delta\lambda/n$ ). Esta relación puede ser expandida en crear un valor conocido como factor de resolución ( $FR$ ), el cual está determinado por la relación entre el ancho de rendija y el ancho de pixel. Como uno esperaría, cuando  $A_r \approx A_p$  el factor de resolución es 3. Cuando  $A_r \approx 2A_p$  el factor de resolución cae a 2.5, y continua cayendo hasta que  $A_r > 4A_p$  cuando

el factor de resolución se nivela en 1.5 [11]. Toda la anterior información puede ser resumida en la siguiente ecuación:

$$\delta\lambda = \frac{FR \times \Delta\lambda \times A_R}{n \times A_p} \quad (Ec.5)$$

#### 1.4. Espejo colimador

El espejo colimador, como lo dice su nombre colima la luz divergente proveniente del cable de fibra, dado que la luz contiene el espectro que buscamos analizar es necesario capturar la mayor cantidad de luz posible para mejorar la intensidad de nuestra señal, para lograrlo es necesario que las aperturas numéricas de los elementos ópticos sean las adecuadas, es decir dado que el cable de fibra tiene una apertura numérica de 0.39, el espejo colimador debe tener una apertura numérica igual a 0.39 o mayor a esta. Para conocer la distancia a la que debemos colocar el espejo de la salida del cable ( $s_o$ ), para que los rayos reflejados del espejo estén colimados ( $s_i \rightarrow \infty$ ), nos referimos a la fórmula de los espejos cóncavos [12] ( $f > 0$ ):

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (Ec.6)$$

Sustituyendo

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{f} \quad (Ec.7)$$

Entonces

$$s_o = f \quad (Ec.8)$$

El extremo de salida del cable de fibra óptica debe estar colocado justamente el foco del espejo colimador.

##### 1.4.1. Espejo esférico Edmund Optics #43-537

Se decidió utilizar este espejo porque era el que se tenía disponible con características cercanas a las necesarias (distancia focal corta y apertura numérica cercana a 0.39) para construir el espectrómetro, las cuales se resumen en la siguiente tabla:

Substrato	BOROFLOAT®
Diámetro (mm)	25.4
Longitud focal efectiva (mm)	50.8
Apertura numérica	0.25
Revestimiento	UV-Aluminio mejorado
Rango de longitud de onda (nm)	250-700

Tabla 1. Características del espejo colimador [13].

## 1.5. Rejilla de difracción

Cuando luz monocromática incide sobre la superficie de la rejilla, esta es difractada en diversas direcciones discretas. Podemos imaginar que cada ranura es una muy pequeña, fuente de luz difractada con forma de rendija. La luz difractada por cada ranura se combina para formar un grupo de frentes de onda difractados. La utilidad de una rejilla depende en el hecho de que existe un único grupo de discretos ángulos a lo largo de los cuales, para un dado espaciamiento  $d$  entre ranuras, la luz difractada de cada faceta está en fase con la luz difractada de cualquier otra faceta, conllevando a interferencia constructiva.

La difracción por una rejilla puede ser visualizada de la geometría de la figura 9 la cual muestra un rayo de luz de longitud de onda  $\lambda$  incidente a un ángulo  $\alpha$  y difractado por una rejilla (de un espaciamiento de ranura  $d$ , también llamado paso) a lo largo del grupo de ángulos  $\{\beta_m\}$ . Estos ángulos son medidos desde la normal de la rejilla, la cual es mostrada como la línea punteada perpendicular a la superficie de la rejilla en su centro. La convención de signo para estos ángulos depende en si la luz es difractada en el mismo lado o en el lado opuesto de la rejilla como la luz incidente. En la figura 9, la cual muestra una rejilla de reflexión, los ángulos  $\alpha > \beta$  y  $\beta_1 > 0$  (dado que ambos están medidos en contra de las manecillas del reloj desde la normal de la rejilla) mientras que los ángulos  $\beta_0 < 0$  y  $\beta_{-1} < 0$  (dado que están medidas en el sentido de las manecillas del reloj desde la normal).

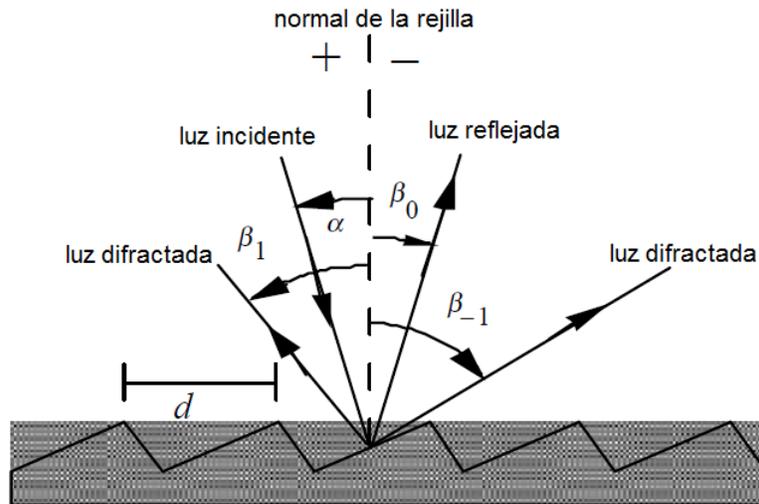


Fig. 9. Rejilla de reflexión: los rayos incidentes y difractados caen en el mismo lado de la rejilla [14].

Otra ilustración de la rejilla de difracción, usando frentes de onda (superficies de fase constante), se muestra en la figura 10. La diferencia de camino geométrico entre luz proveniente de dos ranuras adyacentes se puede ver es  $d \sin \alpha + d \sin \beta$ . (Dado que  $\beta < 0$ , el término  $d \sin \beta$  es negativo.) El principio de interferencia constructiva dicta que solamente cuando la diferencia es igual a la longitud de onda  $\lambda$  de la luz, o algún múltiplo entero de la misma, la luz de las ranuras adyacentes se encontrará en fase (conllevando a interferencia constructiva). En todos los demás ángulos las ondas originadas desde las facetas de la ranura interferirán destructivamente.

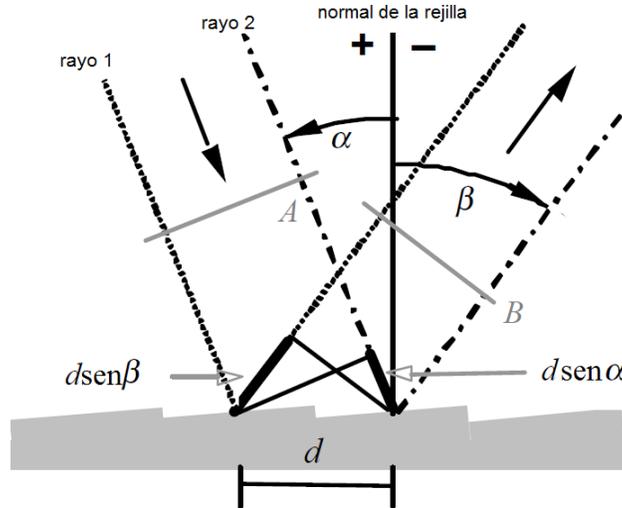


Fig. 10. Geometría de la difracción, para frentes de onda planos. Dos rayos paralelos, etiquetados 1 y 2, inciden en la rejilla una ranura espaciada  $d$  aparte y están en fase uno con el otro en el frente de onda de A. Después de la difracción, el principio de interferencia constructiva implica que estos rayos están en fase en el frente de onda difractado B si la diferencia de longitud de su camino,  $d \text{ sen } \alpha + d \text{ sen } \beta$ , es un número entero de su longitud de onda. [14].

Estas relaciones son expresadas por la ecuación de rejilla:

$$m\lambda = d(\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta) \quad (\text{Ec.9})$$

La cual gobierna las locaciones angulares del máximo de intensidad principal cuando luz de longitud de onda  $\lambda$  es difractada desde una rejilla de espaciamiento de ranura  $d$ , Donde  $m$  es el orden de difracción (u orden espectral), el cual es un entero. Para una longitud particular  $\lambda$ , todos los valores de  $m$  para los cuales  $|m\lambda/d| < 2$  corresponden a los órdenes de difracción de propagación (en vez de los evanescentes). El caso especial  $m = 0$  corresponde a la ley de reflexión  $\beta = -\alpha$ .

Algunas veces es conveniente escribir la ecuación de rejilla como:

$$Gm\lambda = \text{sen } \alpha + \text{sen } \beta \quad (\text{Ec.10})$$

Donde  $G = 1/d$  es la frecuencia de línea o densidad de línea, más comúnmente llamada “líneas por milímetro”.

La ecuación 9 y su equivalente ecuación 10 son las formas comunes de la ecuación de rejilla, pero su validez está restringida para casos en los que la luz incidente y los rayos difractados recaen en un plano que es perpendicular a las ranuras (en el centro de la rejilla) [14].

### 1.5.1. Rejilla de difracción holográfica Edmund Optics #43-772

Desde finales de los sesenta, un método distinto del reglado mecánico ha sido usado para manufacturar rejillas de difracción. Este método involucra el grabado fotográfico de un patrón de líneas de interferencia estacionario. Dadas rejillas de interferencia, más

comúnmente (aunque imprecisamente) conocidas como rejillas de difracción holográficas, tienen varias características que las distinguen de las rejillas regladas.

Cuando dos conjuntos de ondas planas ópticas monocromáticas coherentes igualmente polarizadas de la misma intensidad interactúan una con la otra, un patrón de onda estacionarios será formado en la región de intersección de ambos conjuntos de ondas de la misma longitud de onda  $\lambda$  (véase figura 11). La distribución de intensidad combinada forma un grupo de líneas rectas igualmente espaciadas (líneas oscuras y brillantes). En consecuencia una placa fotográfica grabará un patrón de líneas, dado que las regiones de cero intensidad de campo dejarán al film sin exponer mientras que las regiones de máxima intensidad dejarán el film máximamente expuesto. Regiones entre estos extremos, para las cuales la intensidad combinada no es máxima ni cero, dejarán al film parcialmente expuesto. La intensidad combinada varía sinusoidalmente con la posición cuando el patrón de interferencia es visto a lo largo de una recta. Si los haces no son de igual intensidad, el mínimo de intensidad no será cero, por lo tanto disminuirá el contraste entre líneas. Como una consecuencia, todas las porciones de la placa fotográfica estarán expuestas en algún grado [14].

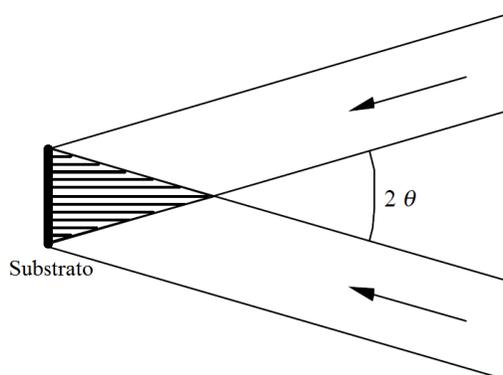


Fig. 11. Formación de líneas de interferencia. Dos haces colimados de longitud de onda  $\lambda$  forman un patrón de interferencia compuesto de planos rectos igualmente espaciados de máxima intensidad (mostrados como líneas horizontales). Un patrón de interferencia sinusoidalmente variante es encontrado en la superficie de un sustrato colocado perpendicularmente a estos planos [14].

Dimensiones (mm)	12.7 x 12.7
Tolerancia en dimensión (mm)	$\pm 0.5$
Densidad de líneas (líneas/mm)	1200
Espesor (mm)	6
Longitud de onda óptima	UV
Eficiencia de Difracción Absoluta (%)	45 – 65
Substrato	Float Glass
Recubrimiento	Aluminio

Tabla 2. Características de la rejilla holográfica [15].

Se decidió trabajar con la rejilla holográfica de Edmund Optics #43-772, por sus pequeñas dimensiones, además de que está diseñada para optimizar longitudes de onda ultravioleta al igual que el espejo colimador, como se puede apreciar en la tabla 2 y en la figura 12:

## Curvas de eficiencia típicas para Rejillas Holográficas Optimizadas para espectro Ultravioleta (UV)

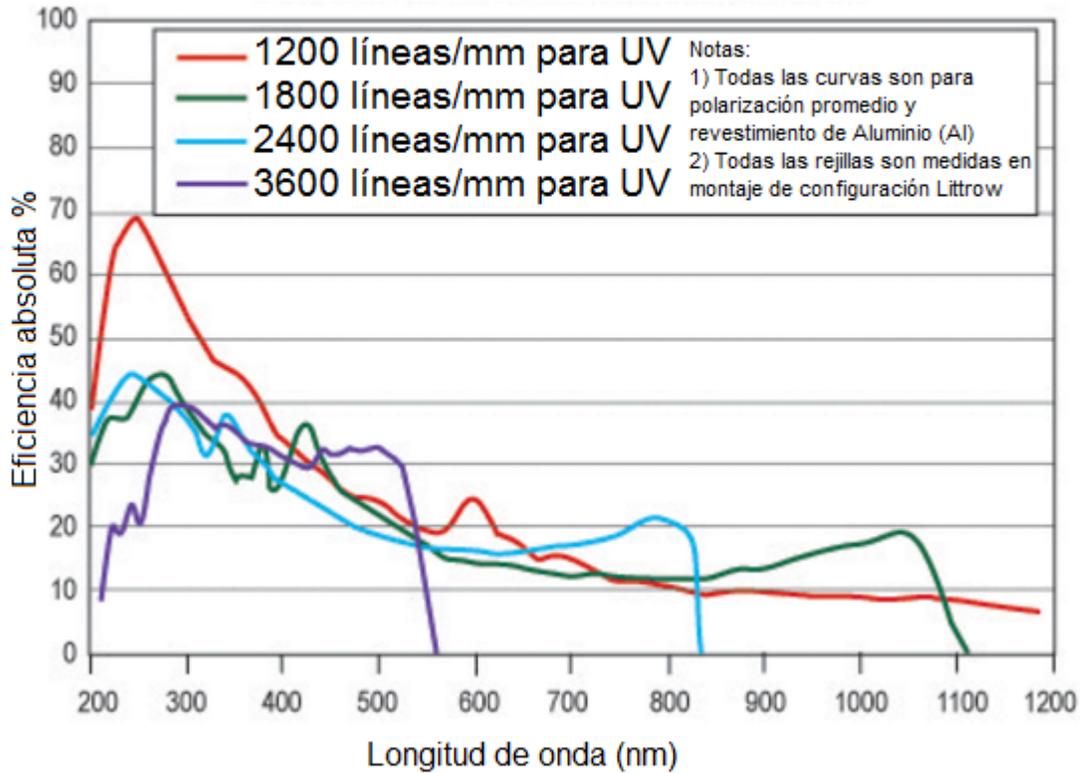


Fig. 12. Rejilla de reflexión: los rayos incidentes y difractados caen en el mismo lado de la rejilla [15].

### 1.6. Espejo de enfoque

Este espejo tiene la función de crear una imagen más pequeña del espectro proveniente del primer orden de difracción de la rejilla sobre el detector, de esta forma podemos ajustar el rango de longitud de onda que se va a analizar, dado que la luz incidente en la rejilla de difracción esta colimada, la luz difractada también estará colimada y por lo tanto  $s_o \rightarrow \infty$ , sustituyendo en la ecuación 6, resulta:

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (Ec. 11)$$

De esta forma:

$$s_i = f \quad (Ec.12)$$

Lo que significa que la imagen se formara en la distancia focal del espejo, siendo esta la posición en la que se debe colocar el detector.

### 1.6.1. Espejo de enfoque Edmund Optics #43-535

Este espejo fue seleccionado porque tiene una apertura numérica grande y por ende puede capturar una buena cantidad de luz, además de tener una distancia focal pequeña lo que permite formar una imagen del espectro sobre una pequeña sección del sensor, como lo muestran sus características en la tabla 3:

Substrato	BOROFLOAT®
Diámetro (mm)	25.4
Longitud focal efectiva (mm)	25.4
Apertura numérica	0.5
Revestimiento	UV-Aluminio mejorado
Rango de longitud de onda (nm)	250-700

Tabla 3. Características del espejo colimador [16].

### 1.7. Detector CCD

El CCD, fue desarrollado por en 1970 por el Dr. Boyle en los Laboratorios de Investigación Bell. Como se muestra en la figura 13, consiste de un capacitor MOS con un electrodo agarrado de la parte superior de dióxido de silicio en la superficie del substrato semiconductor. Cuando voltaje es aplicado entre el electrodo y el substrato, se forma una zona de agotamiento en la región cercana a la interfaz del dióxido de silicio y la interfaz del semiconductor, causando que esta región se convierta en un pozo de potencial de baja energía para los portadores de carga minoritarios. Si una señal de carga es generada por radiación lumínica es inyectada en este pozo de potencial, estas señales son temporalmente almacenadas como cantidades análogas.

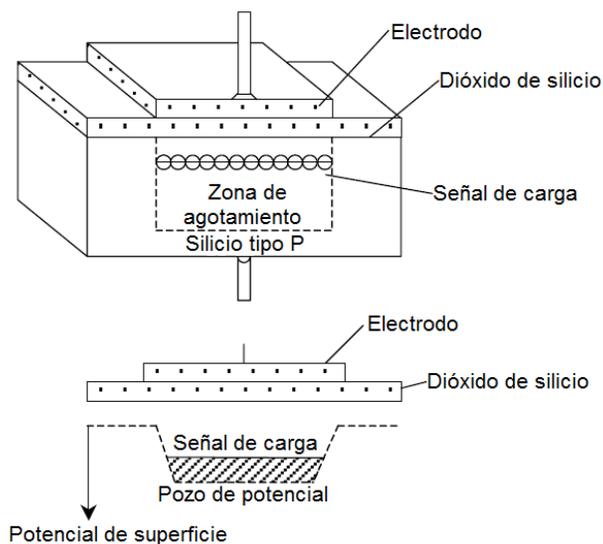


Fig. 13. Diagrama de la estructura básica del CCD [17].

Una explicación del principio de operación del registro de desplazamiento del CCD es el siguiente. Como se muestra en la figura 14, múltiples capacitores MOS son dispuestos en

cercana proximidad y la señal de carga es transferida de un capacitor MOS al siguiente. En otras palabras, cuando la señal de carga almacenada debajo Electrodo  $\phi 1$  en el tiempo  $t 1$  se aplica voltaje positivo al Electrodo  $\phi 2$ , una porción de la señal de carga es desplazada debajo de Electrodo  $\phi 2$  (tiempo:  $t 2$ ). Adicionalmente, disminuyendo el voltaje positivo del Electrodo  $\phi 1$  (tiempo:  $t 3$ ) desplaza la totalidad de la señal de carga debajo del Electrodo  $\phi 2$  (tiempo:  $t 4$ ). Cuando esta operación es realizada repetidamente, la carga es transferida [17].

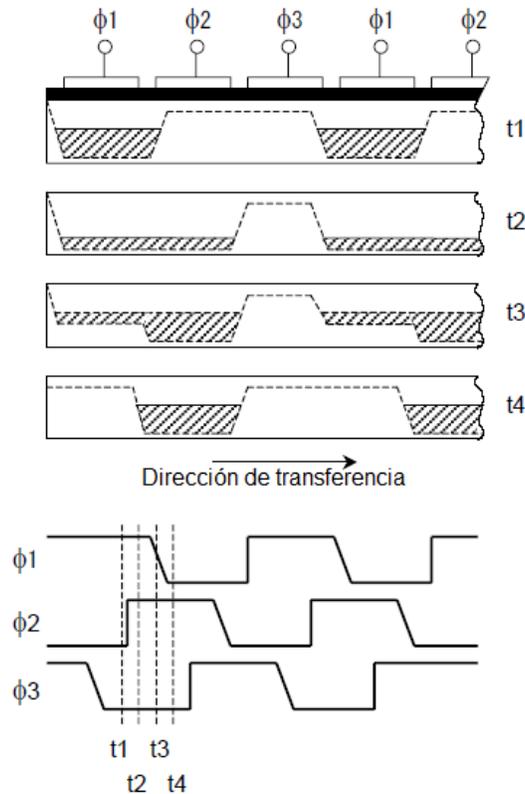


Fig. 14. Principio de operación del CCD, registro de corrimiento análogo [17].

### 1.7.1. CCD TOSHIBA TCD1304DG

El TCD1304DG es un sensor de imagen lineal de 3648 elementos, de alta sensibilidad y baja corriente de oscuridad. El dispositivo consiste en un chip CCD de sensibilidad. Algunas de sus características son [18]:

- Número de píxeles: 3648
- Tamaño de píxel:  $8\mu m \times 200\mu m$
- Región de foto sensado: Fotodiodo pn de alta sensibilidad y baja corriente de oscuridad
- Circuito Interno: Circuito de control CCD
- Fuente de poder: Solo 3.0 Volts
- Empaque: 22 pines

Cada uno de los pines tiene una función específica que se cumple al realizar la adecuada conexión de los mismos, para identificarlos nos referimos a la figura 15, la tabla 4 muestra el nombre de los pines y la tabla 5 las magnitudes físicas permitidas por el dispositivo:

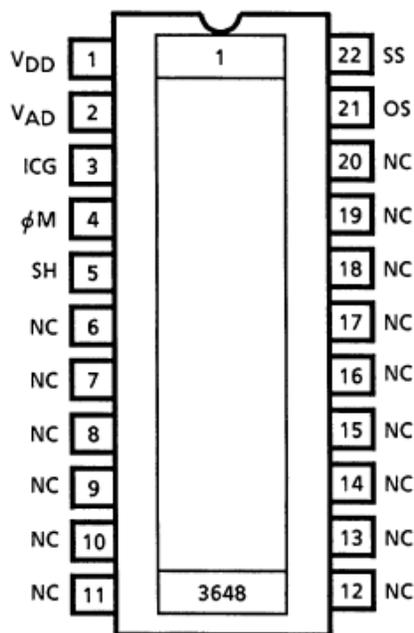


Fig. 15. Diagrama del CCD TCD1304DG [18].

M	Reloj maestro
SH	Señal de obturador
ICG	Señal de integración
V <sub>DD</sub>	Poder (Análogo)
V <sub>AD</sub>	Poder (Digital)
SS	Tierra
OS	Señal de salida
NC	Sin conexión

Tabla 4. Nombre de los pines [18].

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	RANGO	UNIDAD
Voltaje del pulso del reloj maestro	V <sub>M</sub>	-0.3~7	V
Voltaje del pulso de SH	V <sub>SH</sub>		
Voltaje del pulso de ICG	V <sub>ICG</sub>		
Fuente de poder digital	V <sub>DD</sub>		
Fuente de poder analógica	V <sub>AD</sub>		
Temperatura de operación	T <sub>opr</sub>	-25~60	°C
Temperatura de almacenamiento	T <sub>stg</sub>	-40~100	°C

Tabla 5. Valores máximos permitidos, todos los voltajes son respecto a SS (Tierra) [18].

## 1.7.2. Señales de control del TCD1304DG

El sensor requiere de tres señales para su funcionamiento:

- M (Master Clock): es el reloj maestro, esta señal determina que tan rápido puede funcionar el sensor, el rango de frecuencias de funcionamiento que el fabricante indica es de 0.8 a 4MHz. El resto de las señales se generan a de tal forma que tienen una duración basada en los periodos del reloj maestro, como se ve en la figura 16.
- SH (Shift Gate): señal de obturador, define el tiempo de integración, esta señal dura 4 ciclos de M.
- ICG (Integration Clear Gate): señal de integración, su función es vaciar la señal adquirida durante el tiempo de integración y preparar al sensor para una nueva lectura [19].

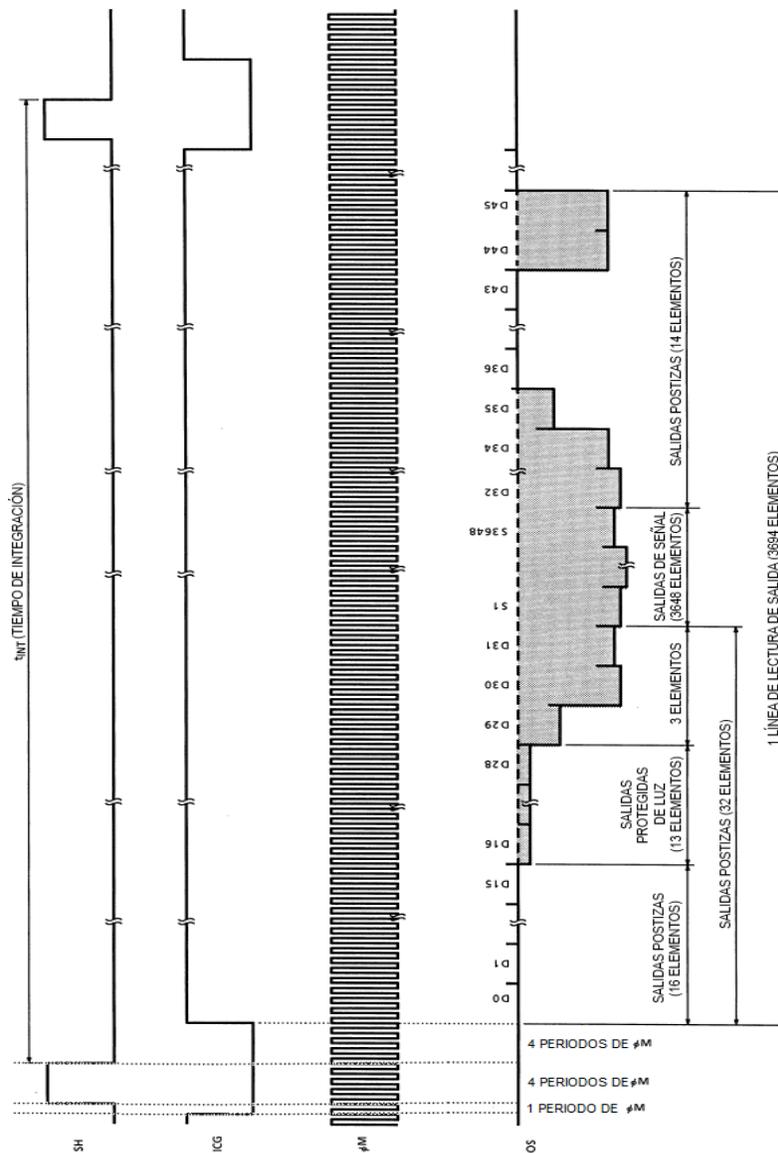


Fig. 16. Diagrama de tiempos de las tres señales necesarias para controlar el CCD [18].

## 1.8. Módulo PL2303 Conversor USB a TTL

Este módulo (figura 17) convierte un puerto USB en un puerto serial, con niveles de voltaje TTL (Transistor Transistor Logic) compatibles con la mayoría de tarjetas microcontroladoras como Arduino/Pic/Raspberry Pi. Posee leds indicadores de transmisión de datos, salidas reguladas de voltaje de 5V y 3.3V, usa el chip PL2303HX de Prolific [20]. Sus especificaciones técnicas son:

- Chip controlador: PL2303HX
- Voltaje de salida: 5V y 3.3V
- Pines TX y RX con niveles de voltaje TTL (0V-5V)
- Leds indicadores de transmisión de datos
- Fusible reseteable automático de 500 mA.
- Trabaja con Win7, Win8, Vista, XP, Linux

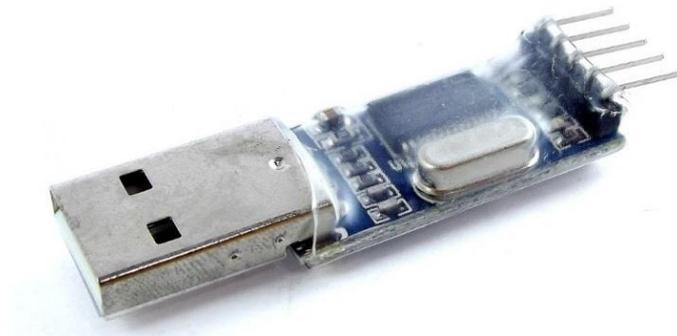


Fig. 17. Módulo PL2303 Conversor USB a TTL [20].

## 1.9. DE0-Nano

Es una tarjeta (figura 18) que introduce una plataforma FPGA (Field Programmable Gate Array) de desarrollo apropiada para el prototipado de diseño de circuitos como robots y proyectos portables [21]. Se ha elegido trabajar con esta tarjeta por su reducido tamaño (49 mm x 75.2 mm), cuenta con un convertidor analógico digital de 8 canales de 12 bits y se puede programar para controlar la cámara CCD.



Fig. 18. DE0-Nano [21].

## 1.10. ADC

Las señales para controlar el ADC (Analog to Digital Converter), se muestran a continuación en la figura 19. La señal SCKL puede tener una frecuencia del rango de 0.8 MHz a 3.2 MHz, debe realizar 16 periodos para brindar un solo número binario de 12 bits proveniente de la digitalización de una señal analógica, SCKL determina el marco de tiempo del reinicio de las señales de la siguiente forma, CS debe estar en nivel bajo durante los 16 periodos, DIN debe estar en bajo el primer periodo y contener el número binario de 3 bits que indica el canal que se está leyendo de los 8 disponibles en el ADC, en los siguientes tres periodos, DOUT brinda el número binario de 12 bits en el resto de los periodos.

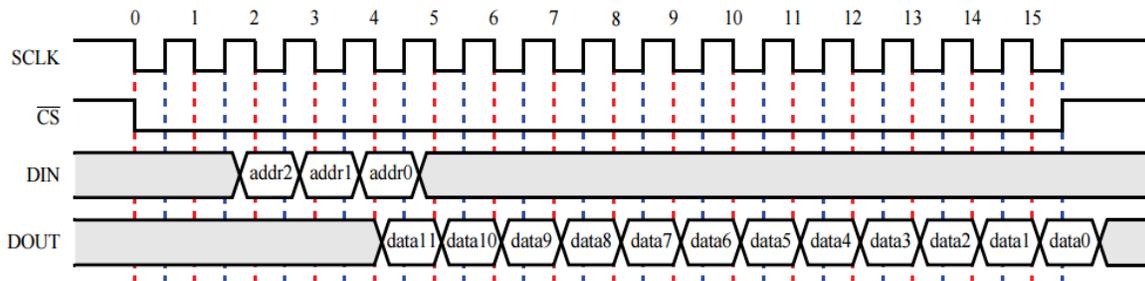


Fig. 19. Diagrama de tiempos de las tres señales necesarias (SCKL,CS,DIN) para controlar el ADC [22].

## 1.11. Quartus II.

Quartus II es una herramienta de software producida por ALTERA para el análisis y la síntesis de diseños realizados en HDL (Hardware Description Language). Quartus II permite al desarrollador o desarrolladora compilar sus diseños, realizar análisis temporales, examinar diagramas RTL (Register-Transfer Level) y configurar el dispositivo de destino con el programador [23]. Es el ambiente de programación (figura 20) que nos permitirá programar la DE0-Nano.



Fig. 20. Ambiente de desarrollo de QUARTUS II de ALTERA.

## 1.12. LabVIEW.

LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware y análisis de datos (figura 21).

El entorno de programación de LabVIEW simplifica la integración de hardware para aplicaciones de ingeniería. LabVIEW reduce la complejidad de la programación. LabVIEW le permite visualizar resultados inmediatamente con la creación integrada de interfaces de usuario de clic-y-arrastre y visualizadores de datos integrados. Para garantizar la compatibilidad con otras herramientas de ingeniería, LabVIEW puede interactuar o reutilizar bibliotecas de otros software y lenguajes de fuente abierta [24].

Se ha elegido LabVIEW porque se pueden crear programas robustos en poco tiempo, al tener funciones para desplegar fácilmente gráficas, adquirir y manipular datos. Lo que resulta ideal para graficar y almacenar espectros.

LabVIEW cuenta con la opción de generar archivos de instalación de los programas que se realizan en dicha plataforma, de esta manera cualquier usuario puede instalar solamente el software diseñado sin tener que sea necesario instalar LabVIEW.



Fig. 21. Ventana de inicio de LabVIEW.

## 2. Desarrollo del espectrómetro

### 2.1. Arreglo Electrónico

El circuito armado se muestra en la figura 22. La terminal 1 y 2 del CCD son los voltajes digital y analógicos respectivamente, las terminales 3, 4 y 5 entradas de las señales M, SH e ICG, el resto de las terminales se conectan a GND (Ground) a excepción de la terminal 21, esta es la salida con la señal de respuesta del CCD y es digitalizada a través del canal del ADC que se encuentra en la DE0-Nano y transmitida rumbo a la computadora a través del Convertido Serial<-> USB, para reproducir la señal en Labview.

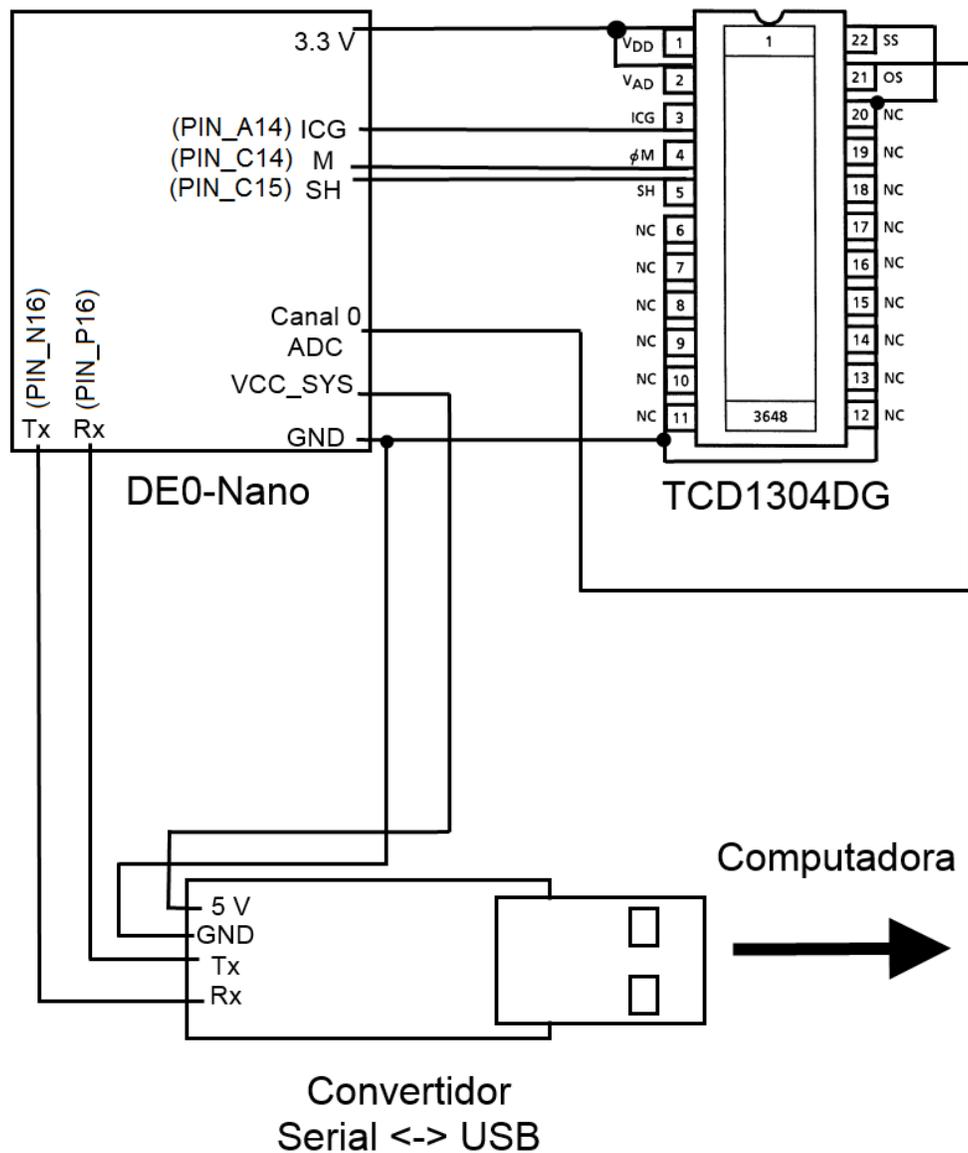


Fig. 22. Diagrama de conexión del circuito armado.

## 2.2. Programación en Quartus II.

La programación del FPGA fue desarrollada en Quartus II a través de VHDL y diagramas de bloques, estos se muestran en la figura 23, el funcionamiento general del programa se describe en el diagrama de flujo figura 24. Se discutirá la función de cada uno de los bloques a continuación.

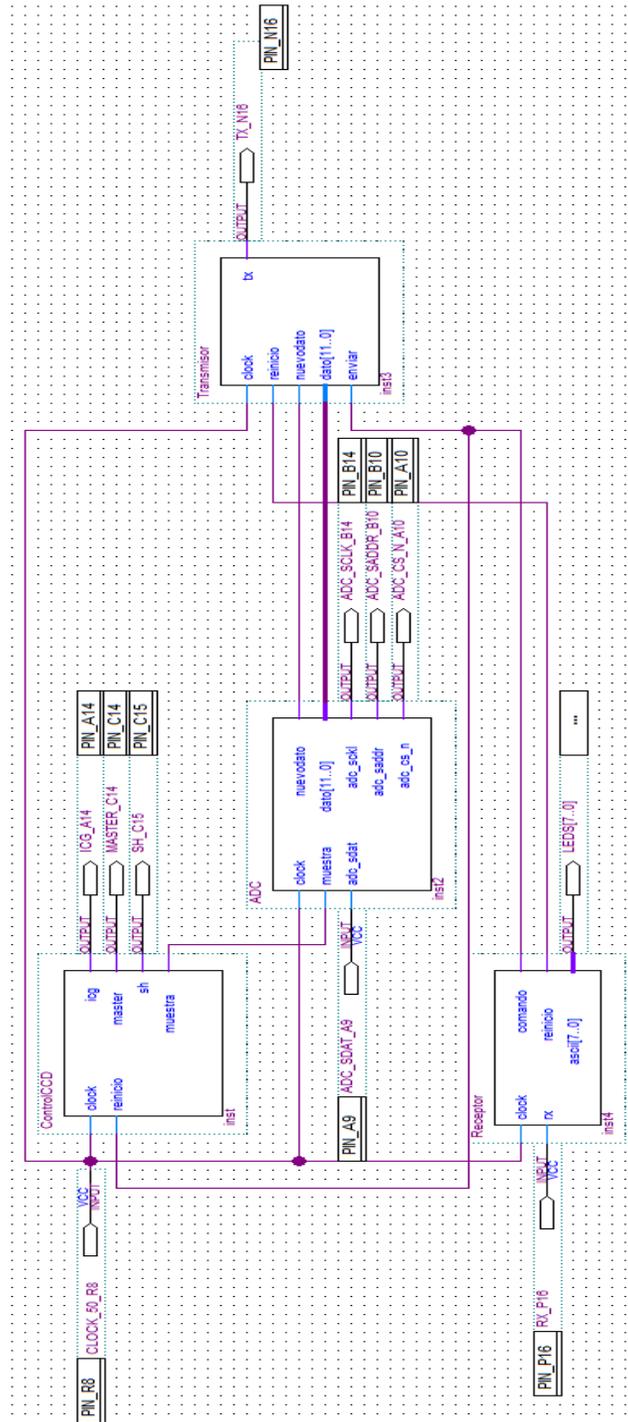


Fig. 23. Diagrama de bloques del programa realizado en Quartus II.

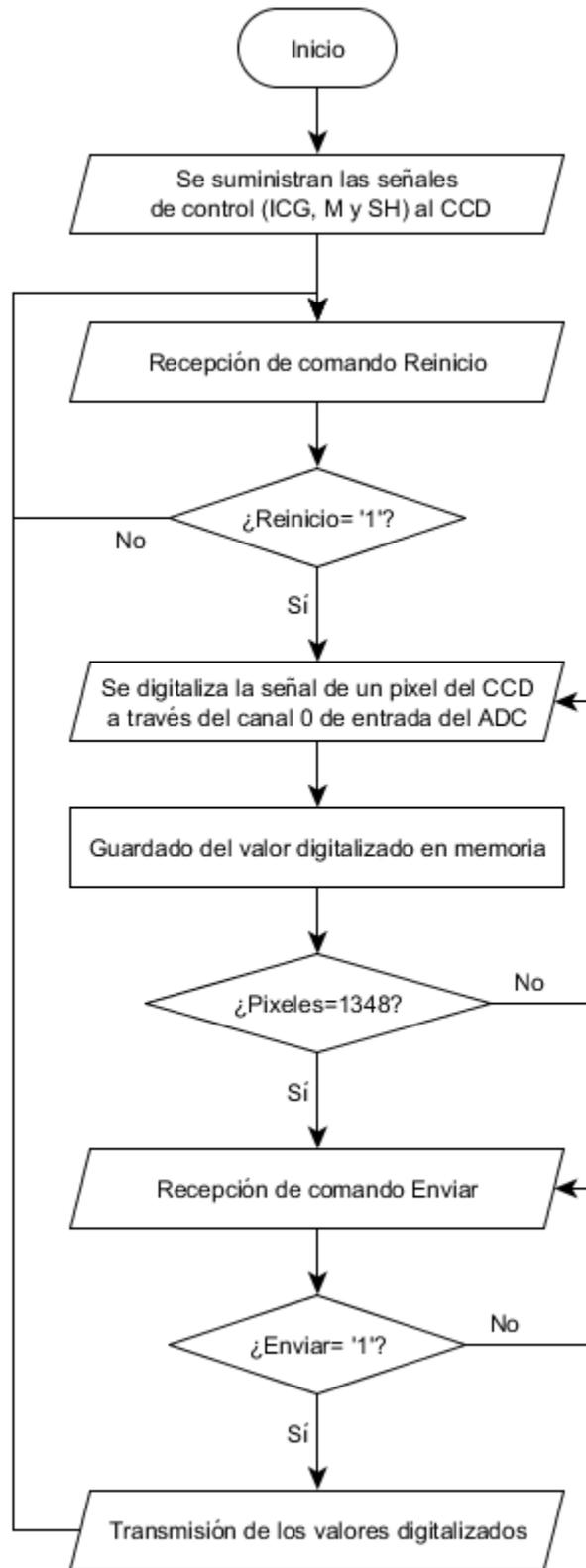


Fig. 24. Diagrama de flujo del programa realizado en Quartus II.

### 2.2.1. Frecuencias de funcionamiento

Para lograr que el espectrómetro funcionara adecuadamente, fue necesario generar una serie de frecuencias para los bloques de programación que se observan en la figura 23. La frecuencia que estableció el límite de velocidad al que el espectrómetro puede trabajar, es dada por el convertidor ADC. La forma de generar las frecuencias de los bloques fue programar varios divisores de frecuencia del oscilador de 50 MHz con el que cuenta la tarjeta DE0-Nano, cada divisor de frecuencia divide por una cantidad diferente para generar una frecuencia específica. Se experimentaron con diversas frecuencias hasta encontrar aquellas que nos permitían trabajar a la mayor velocidad posible del sensor, del convertidor ADC y la transmisión de datos. Las frecuencias que se programaron se muestran en la tabla 6.

Señal	Divisor	Frecuencia (MHz)
Master clock	56	0.89
ADC	14	3.6
Baudaje	434	0.11

Tabla. 6. Frecuencia de las señales de los bloques de programación, para encontrar los valores de la columna de frecuencia se dividen los 50 MHz del oscilador de la DE0-Nano, entre el valor de la columna divisor.

Las frecuencias con las que pudimos trabajar solamente pueden generarse con divisores enteros pares. Es necesario indicar que el divisor de la señal Master clock debe ser 4 veces más grande que el divisor de la señal ADC para el correcto funcionamiento del instrumento, debido a que la frecuencia que el sensor entrega el valor de pixel es 4 veces menor que Master clock. Dicho de otra forma el tiempo en el que el valor de pixel está disponible en la salida del sensor, debe ser el mismo tiempo en el que se lleva a cabo su digitalización, como se mencionó en el epígrafe 1.10, este tiempo equivale a 16 periodos de la señal ADC. Hay que aclarar que la frecuencia a la que el ADC se programó es mayor a la que el fabricante recomienda usar, sin embargo no presentamos problemas al utilizar esta frecuencia.

Para comprobar que las señales eran generadas efectivamente por el programa, se midieron en un osciloscopio, solamente la señal Master clock se reporta en la sección 2.11 más adelante. La frecuencia del 0.11 MHz se eligió simplemente porque LabVIEW no soporta comunicación serial superior a un baudaje de 115200.

### 2.2.2. Bloque ControlCCD

El trabajo de esta entidad (figura 25) es generar una frecuencia de 0.89 MHz para el master clock (master), a partir de su reloj de entrada de 50 MHz (clock) por medio de un divisor de frecuencia, reiniciar la señal que activará al ADC (muestra) y generar los relojes adicionales para controlar el CCD (sh y icg), su código se adjunta en el anexo A.

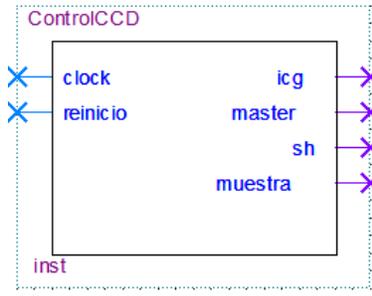


Fig. 25. Entidad ControlCCD.

### 2.2.3. Bloque ADC

Este bloque (figura 26) se encarga de hacer las tareas necesarias para controlar el ADC, primero debe generar una frecuencia de 3.6 MHz para el funcionamiento del ADC (`adc_sckl`), a partir de su reloj de entrada de 50 MHz (`clock`) por medio de un divisor de frecuencia, la entidad se encuentra activa cuando la señal proveniente de ControlCCD se encuentra en alto (`muestra`) y la señal de salida (`adc_cs_n`) se encuentra en bajo, el valor digital de la señal analógica que se está digitalizando en el canal seleccionado (`adc_saddr`) se entrega bit a bit en la entrada restante (`adc_sdat`). El valor digitalizado en un vector constituido por 12 bits sale por (`dato [11..0]`) y cada vez que hay un nuevo valor digital disponible (`nuevodato`) genera un pulso positivo, su código se encuentra en el anexo B.

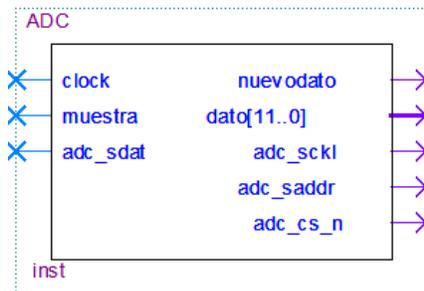


Fig. 26. Entidad ADC.

### 2.2.4. Bloque Transmisor

Transmisor (figura 27) es la entidad encargada de almacenar el valor digital de cada pixel para posteriormente transmitirla hacia la computadora, primero generar una frecuencia de 0.11 MHz que constituye el baudaje al que se transmitirá la información a partir de su reloj de entrada de 50 MHz (`clock`) por medio de un divisor de frecuencia, (`reinicio`) es la señal que nos permite regresar a la primera dirección disponible en memoria y reiniciar la transmisión, (`nuevo dato`) indica que el valor disponible en (`dato[11..0]`) debe guardarse en una nueva dirección de memoria y (`enviar`) controla en que momento inicia la transmisión. La salida (`tx`) va entregando bit a bit de información a la frecuencia del baudaje. Cabe aclarar que la memoria diseñada en la entidad Transmisor solamente puede almacenar el valor digitalizado de 1348 pixeles, esto es debido que el procesador reprogramable de la

tarjeta DE0-Nano no cuenta con suficientes elementos lógicos para crear una memoria de mayor capacidad. Su programación está en el anexo C.

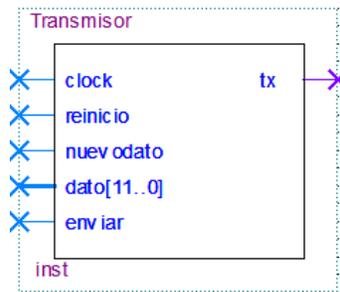


Fig. 27. Entidad Transmisor.

### 2.2.5. Bloque Receptor

Este bloque (figura 28) recibe instrucciones desde la computadora, primero generar una frecuencia de 0.11 MHz que constituye el baudaje al que se recibirá la información a partir de su reloj de entrada de 50 MHz (clock) por medio de un divisor de frecuencia, (reset) restaura los valores iniciales de las señales internas de la entidad, (rx) es la entrada donde se recibe la información en forma serial, (comando) es la señal que se envía hacia el Transmisor para iniciar la transmisión, (reinicio) es una señal de control para reiniciar las entidades ControlCCD y Transmisor, (ascii) es una salida que se conecta a los LED's que se encuentran en la DE0-Nano para visualizar que instrucción se recibió, su diseño se muestra en el anexo D.

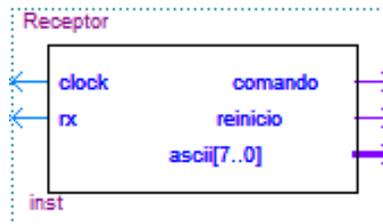


Fig. 28. Entidad Receptor.

### 2.3. Instrumento Virtual Espectro

Este es el programa principal utilizado para el control del espectrómetro, en el panel frontal, figura 29, se puede visualizar los indicadores como el Puerto serial que estamos utilizando para recibir la información del CCD, los Bytes recibidos, los Pixeles activos, los Nanómetros por pixel y la Resolución espectral experimental. Tenemos los controles de Ancho de pico y Umbral de intensidad para que el programa realice el análisis del espectro. Analizar significa separar en secciones del tamaño del valor que se encuentra en el control Ancho de pico, el espectro que se está midiendo, y dentro de estas secciones determinar la longitud de onda a la que le corresponde el máximo valor de intensidad que está por encima del valor del control de Umbral de intensidad.

Si bien es difícil a simple vista visualizar en el indicador Espectro, la longitud de onda a la que está centrado un pico, su intensidad y número de pixel, sí es posible contar la cantidad de picos de emisión. Por lo tanto se deja la tarea al usuario de modificar los valores de los controles Ancho de pico y Umbral de intensidad hasta encontrar la misma cantidad de medidas en los indicadores Números de pixel, Longitudes de onda e Intensidades.

Para estabilizar los valores del espectro debemos usar el control Promediar para hacer un promedio de los espectros que se van analizado, el promediado se realiza desde que se activa la función con el botón Promediar, los consecuentes espectros que se reciben después del presionado del botón son los que forman parte del promedio, en caso de realizar una lectura de un espectro diferente se vuelve a presionar el botón de Promediar. La razón de promediar espectros surgió debido que existen pequeñas fluctuaciones en los valores de longitud de onda e intensidad entre lectura y lectura del espectrómetro, a pesar de que se esté midiendo el mismo espectro, estas fluctuaciones tienen diversas causas entre ellas ruido eléctrico, ruido térmico etc. El programa recibe continuamente un nuevo espectro cada segundo, y se guarda el último espectro desplegado en el indicador Espectro. El espectrómetro trabaja a un solo tiempo de integración (el tiempo que le toma al reloj M oscilar 14780 veces), se eligió este tiempo porque así el detector no se saturaba y los picos de los espectros no se engrosaban, esto representa una limitante en el diseño, a comparación del software comercial disponible que permite modificar el tiempo de integración para diversas aplicaciones.

La función del programa en general es mostrar el espectro, analizarlo y guardar la lectura de espectro deseada, esto se describe en la figura 30. El código que lo constituye se puede observar en la figura 31.

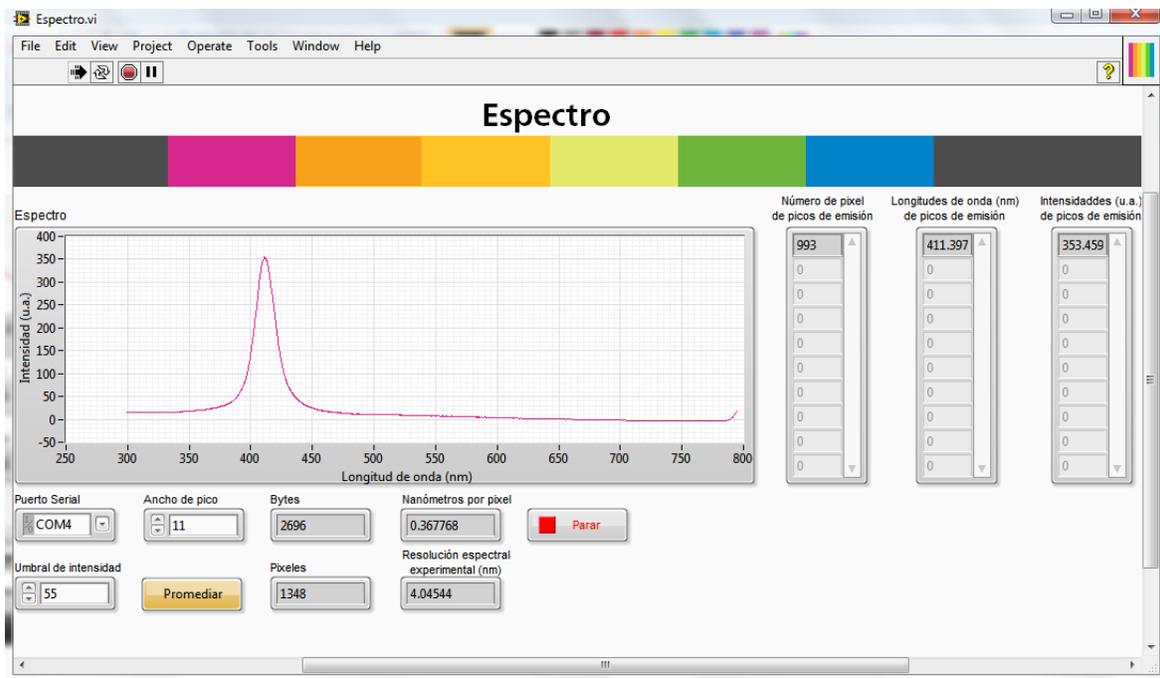


Fig. 29. Panel frontal de Espectro.

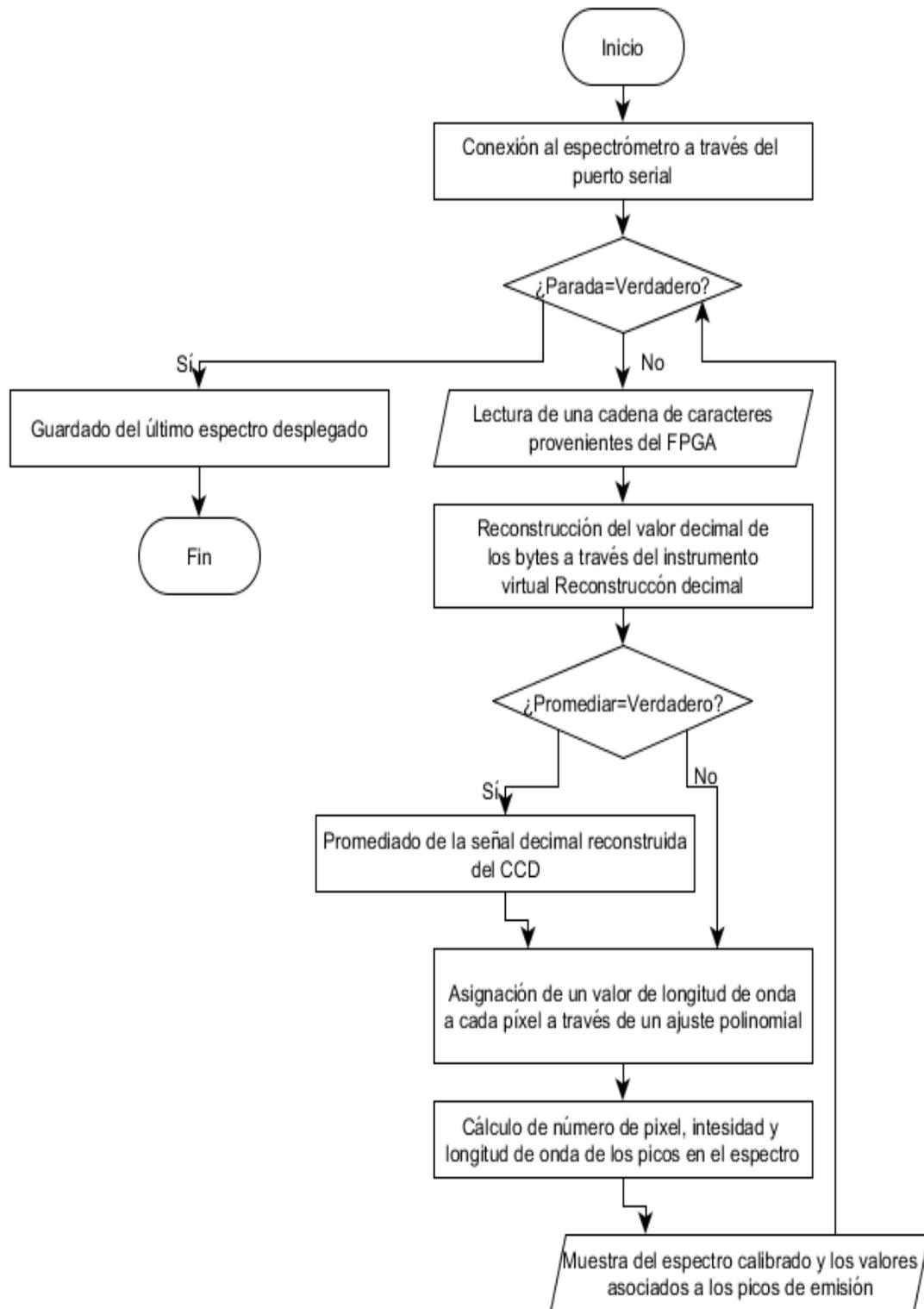


Fig. 30. Diagrama de flujo de Espectro.

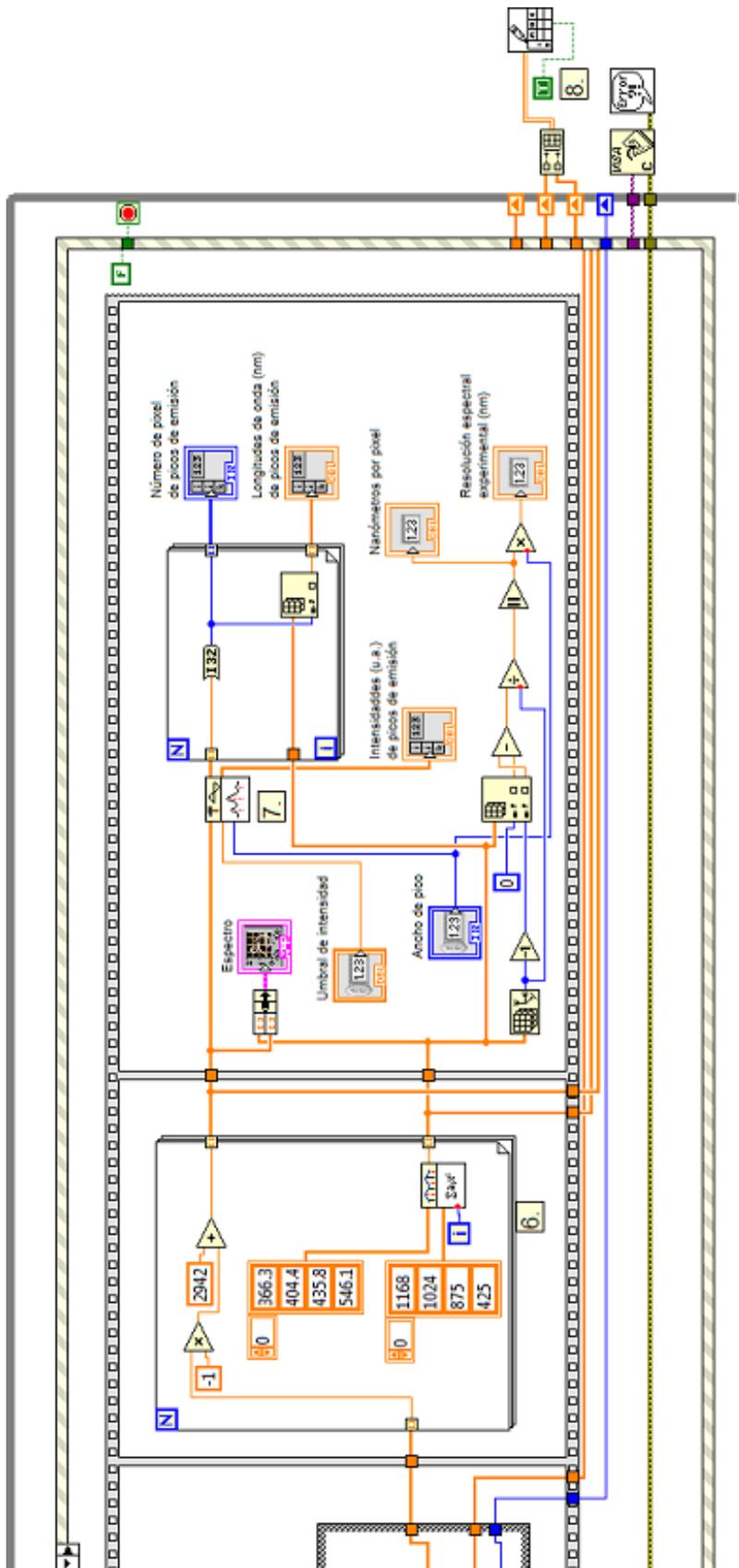
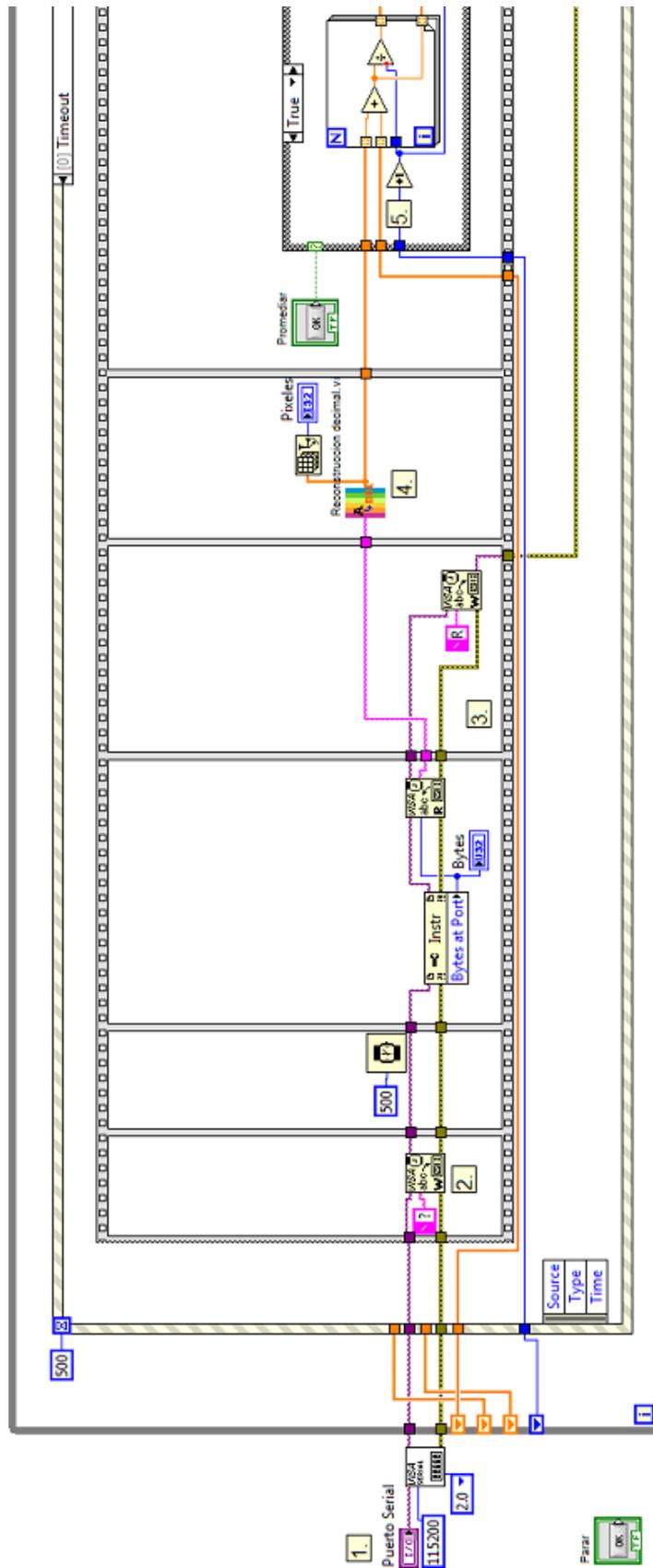


Fig. 31.a. Diagrama de bloques de Espectro (primera parte).



El funcionamiento del instrumento virtual es el siguiente:

1. Se elige el puerto serial al que esta conectado el espectrómetro
2. Se manda el comando "r" para que el FPGA mande la información digitalizada del CCD
3. Se reinicia el FPGA con el comando "R"
4. Se reconstruye el valor decimal de la señal del CCD a través de Reconstrucción decimal.vi
5. Se decide si se quiere promediar la señal del espectrómetro
6. Ajuste polinomial para asignarle a cada pixel un valor de longitud de onda
7. Se calculan los números de pixel, longitudes de onda e intensidades de los picos del espectro
8. Se guarda el último espectro desplegado en el indicador Espectro

Fig. 31.b. Diagrama de bloques de Espectro (segunda parte).

## 2.4. Instrumento Virtual Reconstrucción decimal

La entrada a este instrumento son caracteres leídos en la terminal serial, y su salida es un arreglo de números que representan la señal digitalizada del CCD, como se puede apreciar en la figura 32. La información que se recibe desde el FPGA es código ASCII, sin embargo el valor binario de los caracteres contiene el valor de 12 bits que corresponde a cada pixel, para obtenerlo es necesario tomar cada par de caracteres recibidos y concatenar sus 6 bits menos significativos para obtener el valor. El funcionamiento de este instrumento se resume en la figura 33. La programación realizada se puede observar a detalle en figura 34.

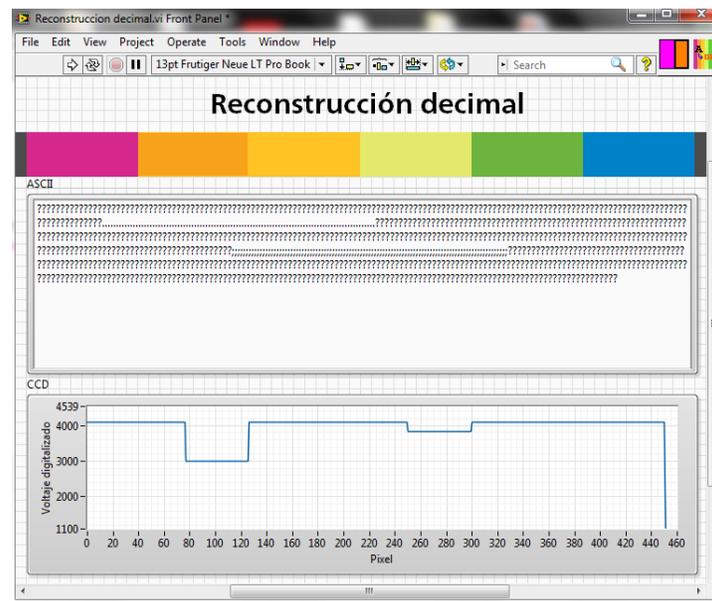


Fig. 32. Panel frontal de Reconstrucción decimal.

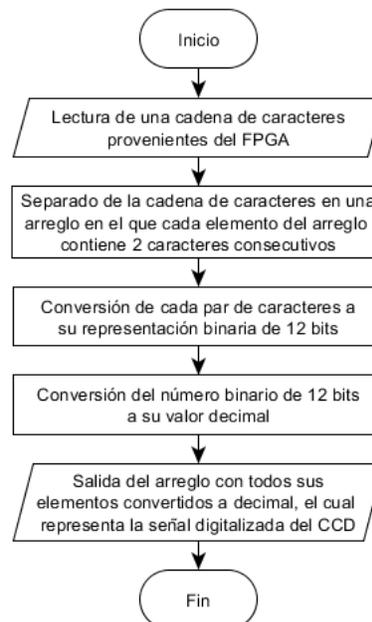
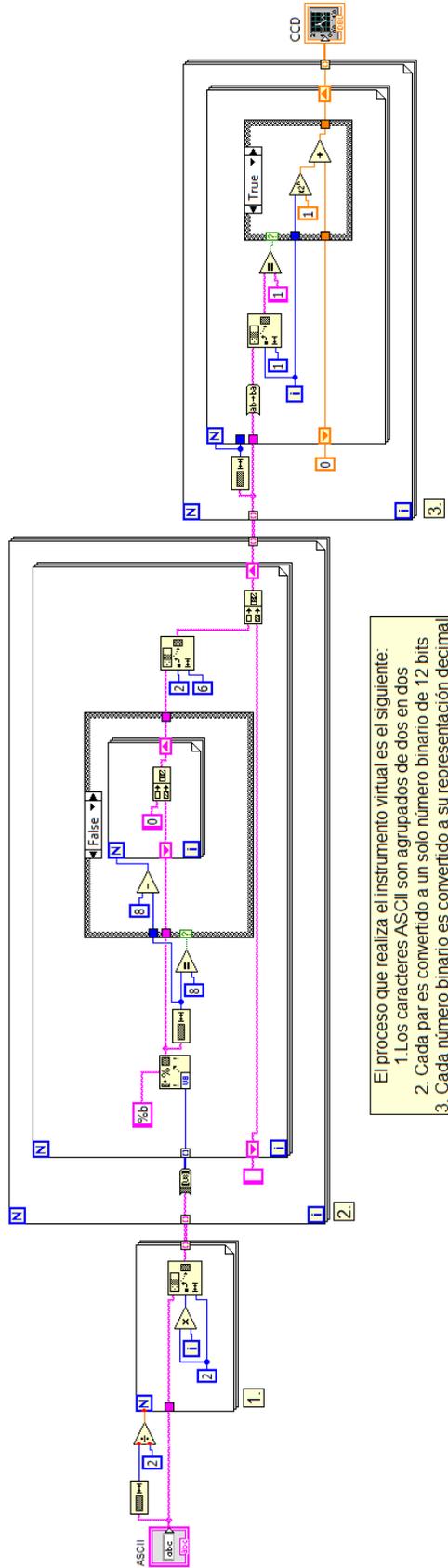


Fig. 33. Diagrama de flujo de Reconstrucción decimal.



El proceso que realiza el instrumento virtual es el siguiente:  
 1. Los caracteres ASCII son agrupados de dos en dos  
 2. Cada par es convertido a un solo número binario de 12 bits  
 3. Cada número binario es convertido a su representación decimal

Fig. 3.4. Diagrama de bloques de Reconstrucción decimal.

## 2.5. Instrumento Virtual Analizador de espectros

Los espectros se guardan en un documento de texto con dos columnas separadas por un espacio, en la primera columna se encuentran las longitudes de onda y en la segunda la intensidad asociada a cada longitud de onda. Este formato puede ser leído diversos tipos de software que grafican datos, para ofrecer una opción más al usuario, se programó un instrumento virtual que muestra los espectros guardados como se puede observar en la figura 35, además con este programa es fácil obtener las longitudes de onda y las intensidades de los picos de emisión, solamente deben cambiar los valores de los controles Umbral de intensidad y Ancho de pico hasta encontrar todos los picos que se observan en el espectro. La figura 36 muestra el procedimiento del programa, y la figura 37 el programa en sí.

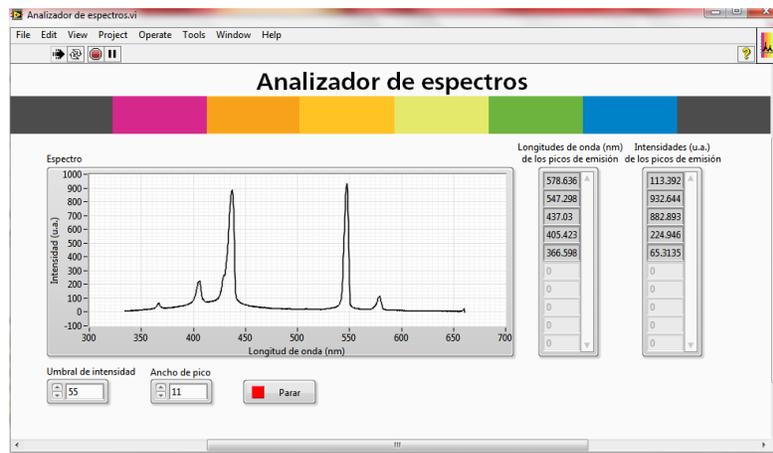


Fig. 35. Panel frontal de Analizador de espectros.

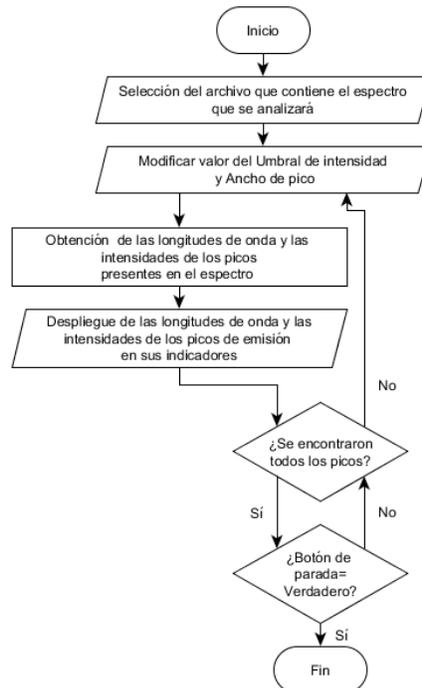


Fig. 36. Diagrama de flujo de Analizador de espectros.

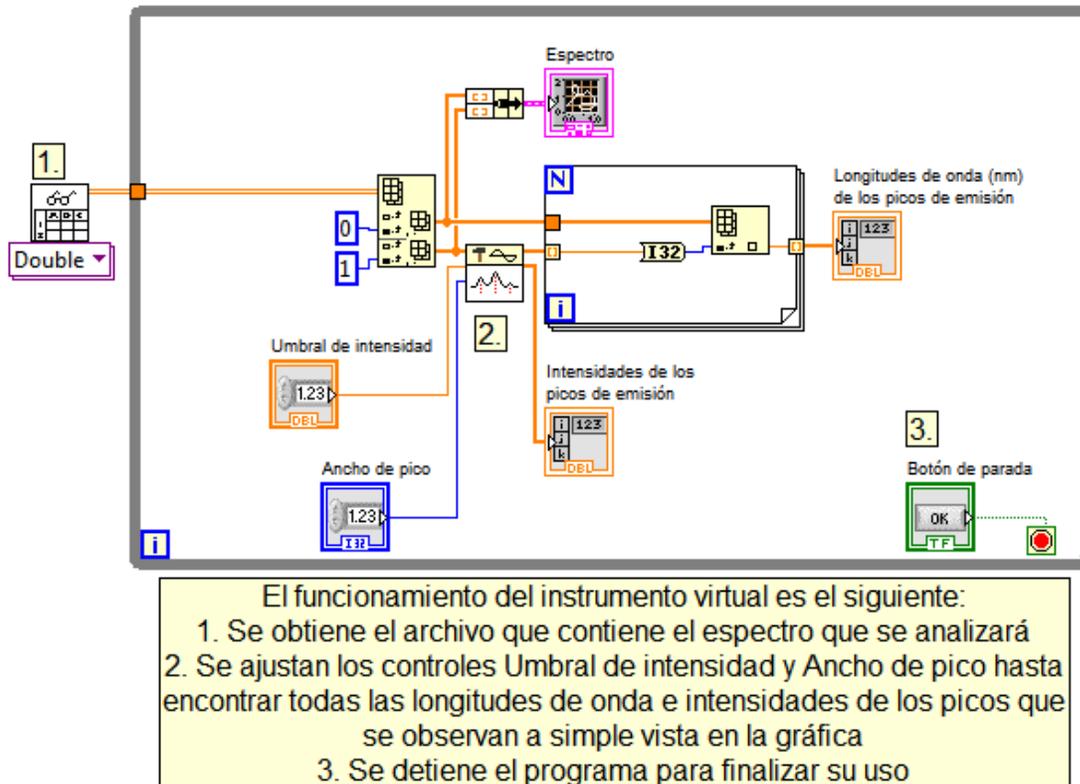


Fig. 37. Diagrama de bloques de Analizador de espectros.

## 2.6. Banco óptico

La construcción del banco óptico se inspiró en el USB4000 de Ocean Optics, sin embargo debido a que las características ópticas de los componentes que lo conforman son diferentes, se optó por hacer diversos arreglos ópticos de los elementos ópticos que se tenían disponibles, hasta encontrar aquel que nos permitiera obtener un espectrómetro de dimensiones pequeñas y que pudiera seleccionarse diversas partes del espectro óptico a través de rotar la rejilla de difracción (ajustable). Para experimentar con las diversas posibilidades para armar el banco óptico utilizamos una mesa óptica sobre la que montamos los componentes, buscamos que el arreglo óptico permitiera disponer el detector CCD de tal forma que solamente captara la luz proveniente del espejo de enfoque, puesto que la luz extraviada era un problema presente en varios arreglos ópticos que se diseñaron, además de que el espectro visible de una fuente de luz blanca, se viera sobre el plano del detector nítido y brillante, significando esto que el espectro estaba bien enfocado y que se captaba una buena cantidad de luz. Para poder ajustar el espectrómetro a diversas secciones del espectro, es necesario rotar la rejilla de difracción pequeños ángulos, sin necesidad de mover el resto de los componentes ópticos, siempre que se mueve un componente óptico es necesario realizar una nueva calibración cuyo procedimiento se discutirá en la siguiente sección. Una vez que encontramos cual era el arreglo definitivo que contaba con las características antes mencionadas se diseñó una caja (figura 38) que fue impresa por medio de una impresora 3D, los resultados se muestran en las figuras 39 y 40. Además un croquis que señala el camino que sigue la luz en el banco óptico construido se puede observar en la figura 41.

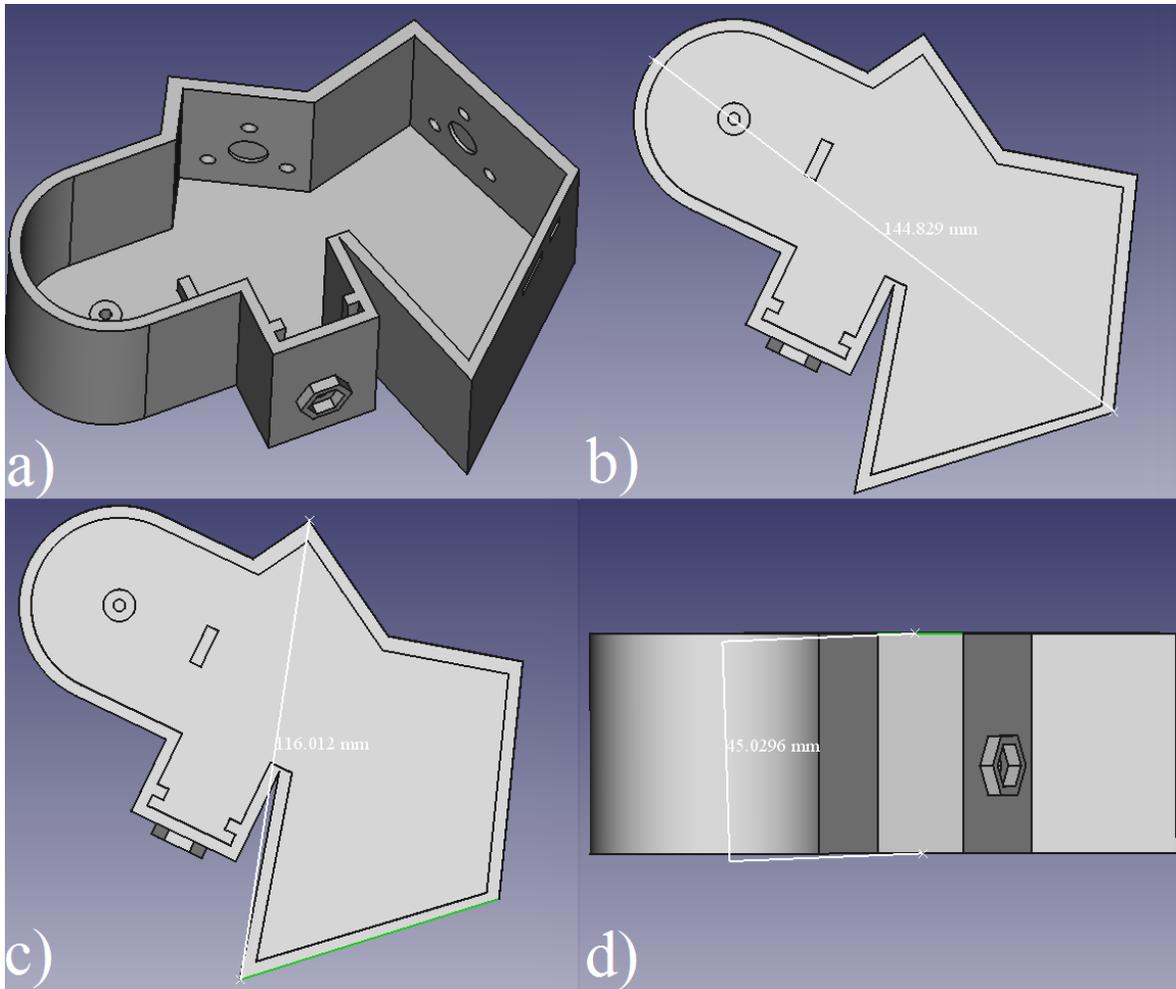


Fig. 38. a) Diseño 3D de la caja. b) Aproximadamente 144.8 mm en su sección longitudinal. c) Aproximadamente 116.0 mm en su sección transversal. d) Aproximadamente 45.0 mm.

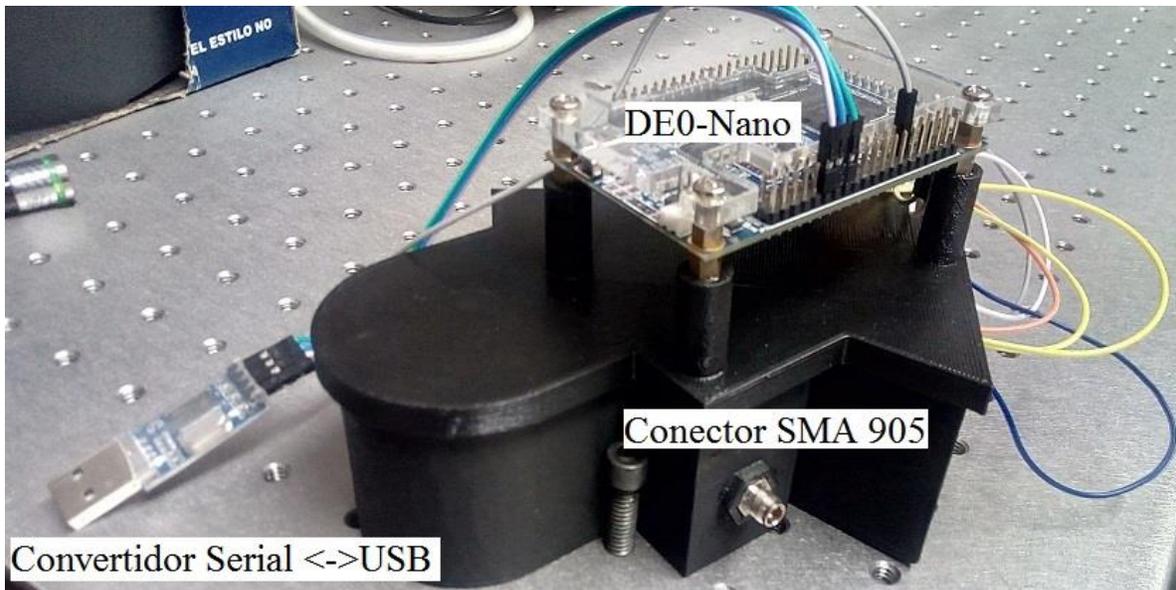


Fig. 39. Espectrómetro.

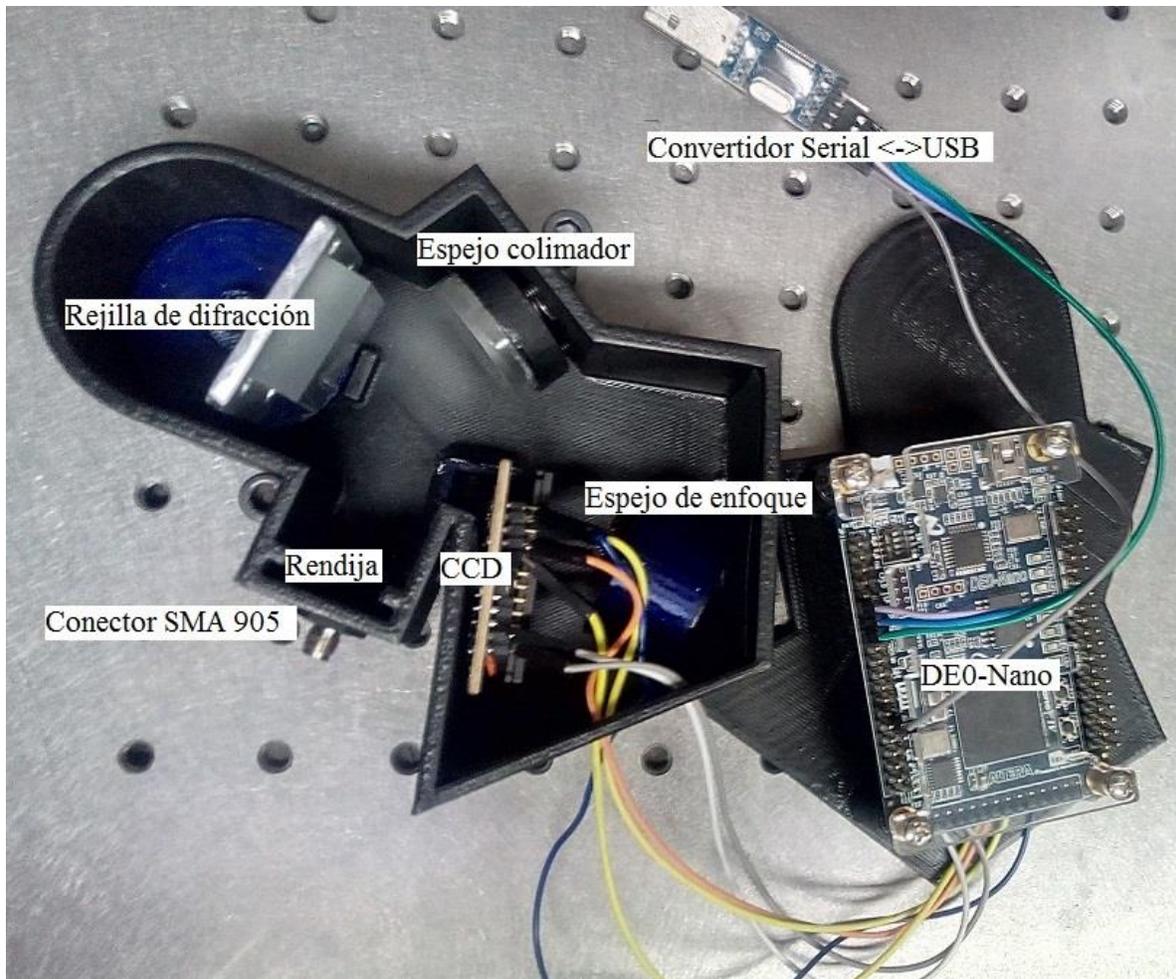


Fig. 40. Caja impresa, conteniendo el banco óptico.

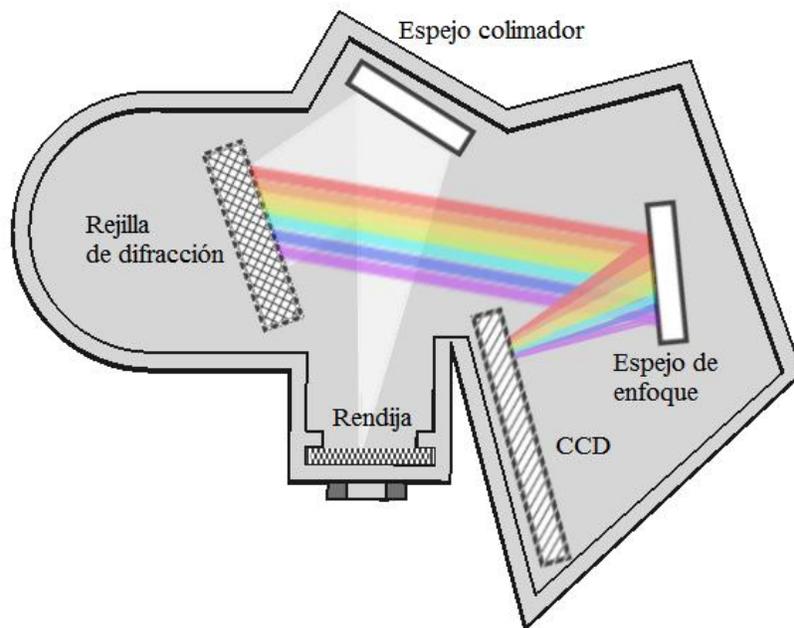


Fig. 41. Croquis del camino que recorre la luz en el banco óptico.

### 2.6.1. Calibración

Una vez que el banco óptico se encontraba armado, se requiere realizar una calibración del instrumento, es decir saber que longitud de onda le corresponde a cada pixel del detector, para lograrlo lo que típicamente se hace es utilizar una fuente de luz con líneas espectrales bien definidas y conocidas, en nuestro caso utilizamos una lámpara de mercurio UVP Pen-ray 90001201. Se propuso hacer un ajuste polinomial debido a que el fabricante Ocean Optics calibra con un polinomio de tercer grado sus espectrómetros, sin embargo como se mencionó antes, debido a que el banco óptico construido en este trabajo no es igual a alguno construido por Ocean Optics, se decidió probar ajustando a polinomios de diverso orden. Para decidir el orden del polinomio empezamos desde el menor orden posible de generar con los picos que se observan en el espectrómetro, es decir con un polinomio de primer grado generado con dos picos de referencia, dado que logramos ver hasta cinco picos característicos de lámpara de mercurio medimos el resto de los picos que no se usaron como referencia. Después realizamos la calibración ajustando a un polinomio de segundo grado, por lo cual requerimos tres picos para generar el polinomio, y medimos los picos restantes que no se utilizaron para el ajuste, así consecutivamente hasta que llegamos al polinomio de cuarto grado. El criterio para decidir el orden del polinomio fue observar el ajuste que más se acercaba a los valores conocidos de las líneas espectrales de mercurio que no se habían utilizado para generar el polinomio. El polinomio que se propuso bajo lo anterior descrito fue un polinomio de tercer grado. La calibración del espectrómetro debe realizarse cada vez que se modifique cualquier componente óptico del mismo, ya sea cambiar la rendija, mover la posición de un espejo o rotar la rejilla de difracción. Si se ha calibrado el espectrómetro y no se hecho un cambio en ningún componente óptico no es necesario volverlo a calibrar.

Los pasos para calibrar el espectrómetro se describen a continuación:

1. Capturar la luz proveniente de la lámpara de mercurio a través del cable de fibra.
2. Abrir el instrumento virtual Espectro y ejecutarlo, para visualizar los diversos picos que conforman el espectro de la lámpara en el indicador gráfico Espectro.
3. Usar el botón Promediar para estabilizar la lectura del espectro.
4. Utilizar los controles Umbral de intensidad y Ancho de pico para encontrar los números de pixel de todos los picos que se observan en el espectro.
5. Detenemos la ejecución del instrumento virtual Espectro.
6. Cambiamos los valores de las constantes de calibración en el Diagrama de bloques del instrumento virtual Espectro, asegurándonos de que cada longitud de onda conocida corresponda certeramente a su número de pixel.

El instrumento virtual Espectro fue programado de tal forma que la calibración solamente está considerada para una lámpara de mercurio y 4 de sus picos, los correspondientes a las longitudes de onda: 366.3, 404.4, 435.8 y 546.1 nanómetros, esto se diseñó así para facilitar la calibración del espectrómetro. Para calibrar con alguna otra fuente que no sea una lámpara de mercurio, se deben cambiar los valores de longitudes de onda del ajuste polinomial, con las correspondientes longitudes de onda de la fuente que se esté utilizando para calibrar, en el Diagrama de bloques del instrumento virtual Espectro. La necesidad de tener que acceder al Diagrama de bloques de Espectro para modificar los valores de calibración fue intencional, de esta forma sería más menos probable que un usuario pudiera descalibrar el espectrómetro por accidente.

## 2.7. UVP Pen-ray 90001201

Esta lámpara se utilizó para calibrar el espectrómetro, su información espectral completa dada por el fabricante se adjunta al final de este documento en el anexo E. Para conocer el desempeño del espectrómetro construido, lo comparamos con un espectrómetro comercial, en la figura 42 podemos observar el espectro de la lámpara medido con el instrumento comercial, en la figura 43 el espectro obtenido por el instrumento que se construyó, y en la figura 44 la comparación entre las mediciones de los dos espectrómetros ajustada en escala. Las longitudes de onda obtenidas se comparan en la tabla 7.

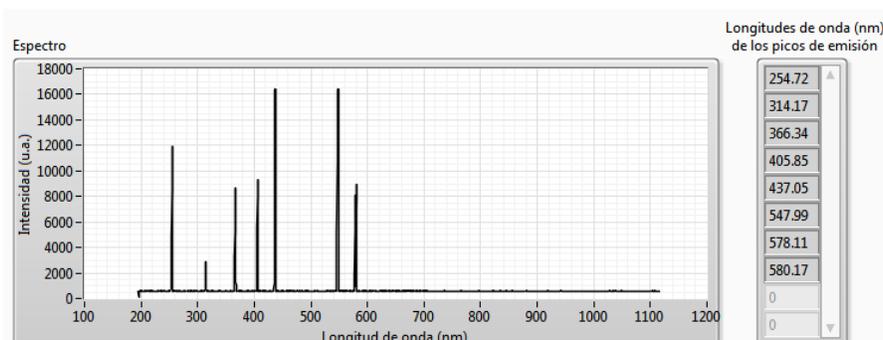


Fig. 42. Espectro de la lámpara de mercurio medido en espectrómetro comercial.

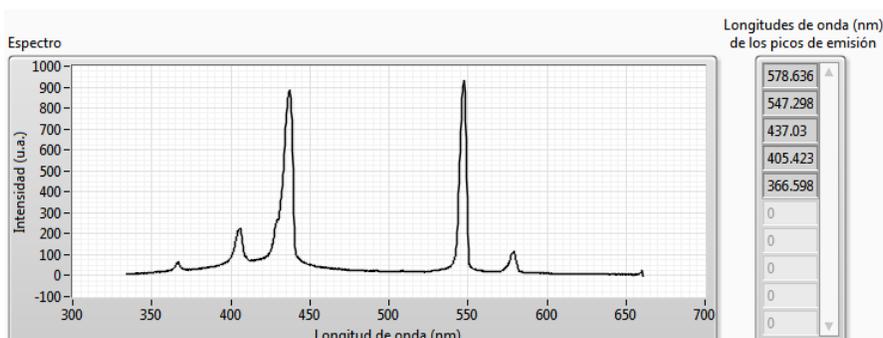


Fig. 43. Espectro de la lámpara de mercurio medido en espectrómetro construido.

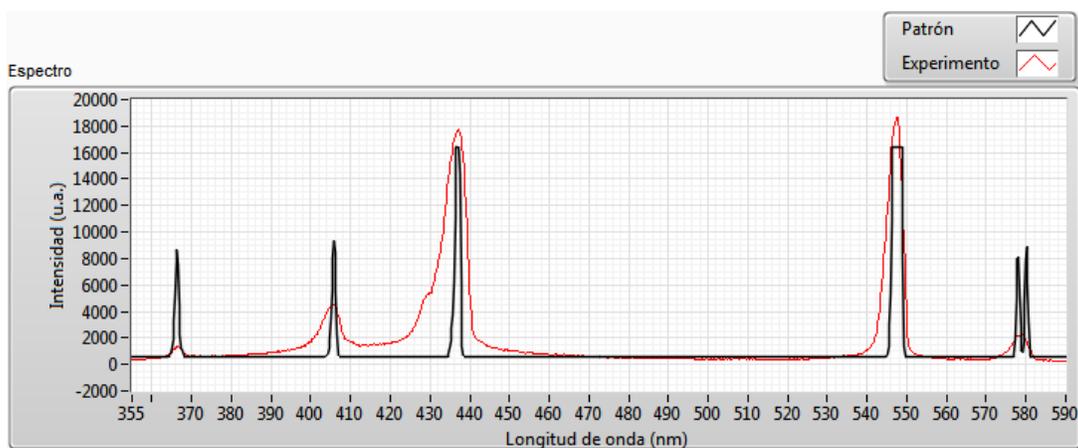


Fig. 44. Comparación del espectro de la lámpara de mercurio medido en espectrómetro construido (experimento), y el espectrómetro comercial (patrón), ajustado en escala.

Fabricante (nm)	Comercial (nm)	Experimental (nm)	Diferencia entre fabricante y comercial (nm)	Diferencia entre fabricante y experimental (nm)	Diferencia entre comercial y experimental (nm)
253.7	254.7	No detectado	1	-	-
313.2	314.1	No detectado	.9	-	-
366.3	366.3	366.6	0	.3	.3
404.4	405.8	405.4	1.4	1	.4
435.8	437	437	1.2	1.2	0
546.1	547.9	547.3	1.8	1.2	.6
577	578.1	578.6	1.1	1.6	.5
579.1	580.1	No detectado	1	-	-

Tabla. 7. Comparación de las longitudes de onda de la lámpara de mercurio, obtenidas por el espectrómetro construido (columna experimental) y comercial, contrastadas con las reportadas por el fabricante de la lámpara.

## 2.8. Láseres

Usamos láseres para comparar el desempeño del espectrómetro armado con uno comercial, puesto que su espectro es casi monocromático, además las empresas que los fabrican brindan información sobre su longitud de onda. El primer láser que se analizó se podía observar a la vista de un color morado, por lo cual le llamamos láser morado. En la figura 45 observamos la lectura del espectrómetro comercial, la cual tiene un perfil más delgado a comparación del espectro medido por el espectrómetro construido en la figura 46, que presenta un ensanchamiento. La figura 47 compara las dos mediciones de los espectrómetros ajustados en escala. La tabla 8 recauda la información acerca de la longitud de onda del láser medida con los espectrómetros.

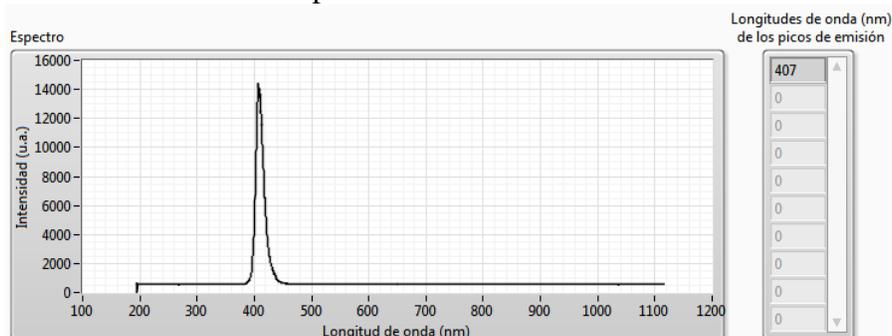


Fig. 45. Espectro de láser morado medido en espectrómetro comercial.

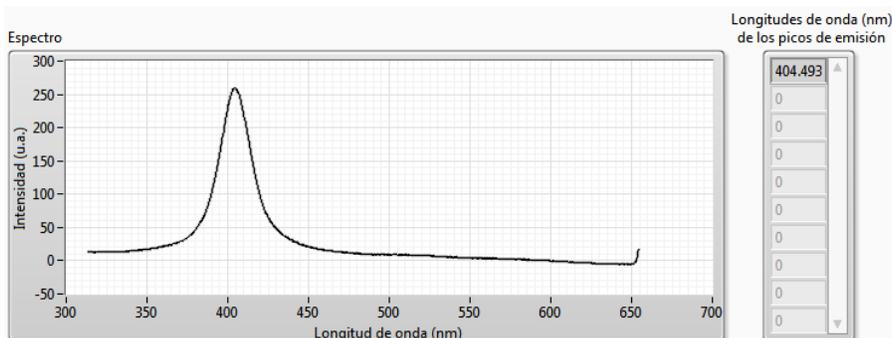


Fig. 46. Espectro de láser morado medido en espectrómetro construido.

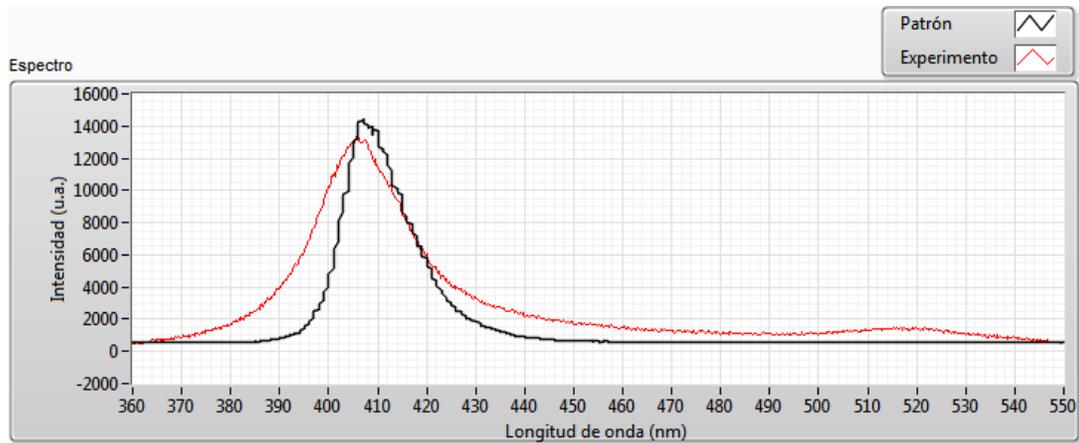


Fig. 47. Comparación de láser morado medido en espectrómetro construido (experimento), y el espectrómetro comercial (patrón), ajustado en escala.

Fabricante (nm)	Comercial (nm)	Experimental (nm)	Diferencia entre fabricante y comercial (nm)	Diferencia entre fabricante y experimental (nm)	Diferencia entre comercial y experimental (nm)
405	407	404.5	2	.5	2.5

Tabla. 8. Comparación de las longitudes de onda del láser morado, obtenidas por el espectrómetro construido (columna experimental) y comercial, contrastadas con las reportadas por el fabricante del láser.

También fue determinado el espectro de un láser verde. En la figura 48 podemos ver que el pico de emisión medido en el espectrómetro comercial, mientras que en la figura 49 se muestra el espectro medido en el espectrómetro que se construyó.

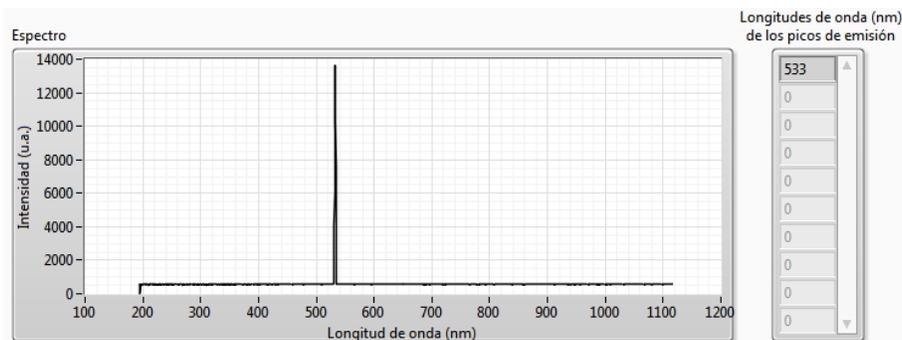


Fig. 48. Espectro de láser verde medido en espectrómetro comercial.

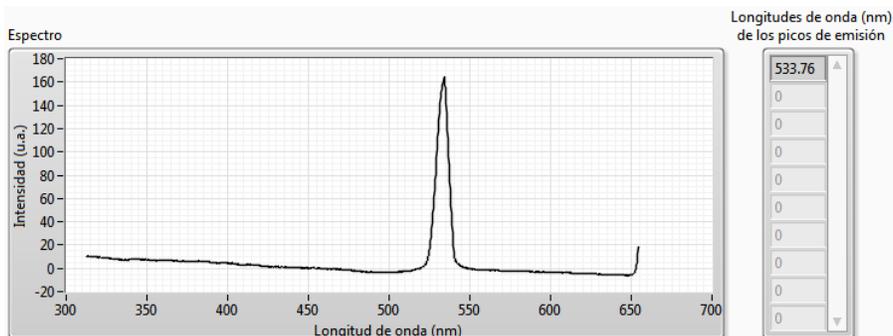


Fig. 49. Espectro de láser verde medido en espectrómetro construido.

En la figura 50 se hace una comparación de las mediciones del láser verde, por los espectrómetros, en el comercial el pico de emisión es angosto, en el espectrómetro construido se observa más ancho, lo que seguramente significa tiene una menor resolución espectral, pero esto se discutirá más adelante. La tabla 9 contiene la información respecto a la longitud de onda obtenida.

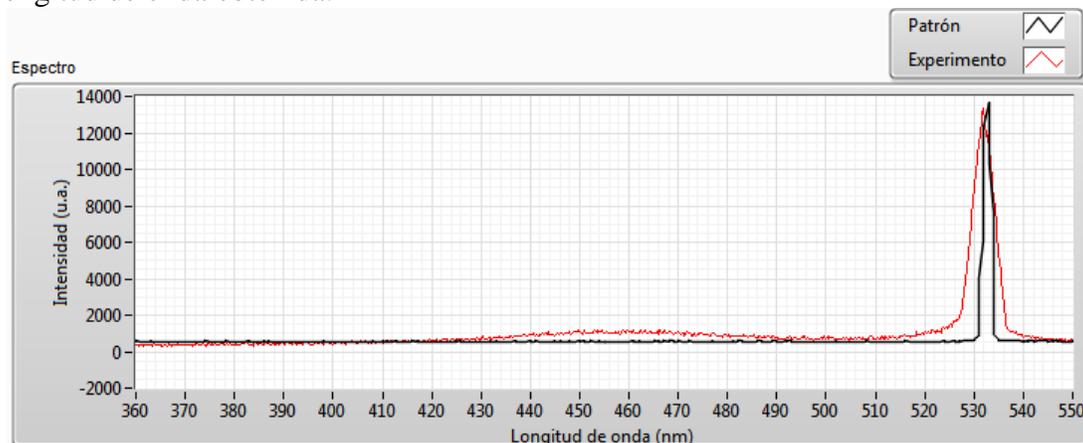


Fig. 50. Comparación de láser verde medido en espectrómetro construido (experimento), y el espectrómetro comercial (patrón), ajustado en escala.

Fabricante (nm)	Comercial (nm)	Experimental (nm)	Diferencia entre fabricante y comercial (nm)	Diferencia entre fabricante y experimental (nm)	Diferencia entre comercial y experimental (nm)
533	533	533.8	0	.8	.8

Tabla. 9. Comparación de las longitudes de onda del láser verde, obtenidas por el espectrómetro construido (columna experimental) y comercial, contrastadas con las reportadas por el fabricante del láser.

## 2.9. LEDs

Otra fuente de luz que se analizó fueron las provenientes de un LED (Light Emitting Diode), dado que es fácil de conseguirlos y se pueden encontrar en diferentes colores, aunque sus espectros no son monocromáticos, sí es posible encontrar un máximo de intensidad para una longitud de onda. En este caso solamente lo medimos con el espectrómetro experimental puesto que queríamos comprobar que el color que observamos emitir al LED, efectivamente correspondía a longitud de onda en el espectro visible. En la figura 51 se muestra la medición hecha para el LED amarillo, el cual tiene su máximo de intensidad en el 595.3 nm, cosa que es correcta en cuanto al rango de nanómetros en el cual puede observarse el color amarillo. El espectro del LED verde (figura 52) está centrado 564.3 nm, cuestión que también es congruente a la ubicación del color verde en el espectro visible. Y en la figura 53 muestra que el LED morado tiene su pico de emisión en el 405.3 nm, lo cual no resultó sorprendente por la similitud del color observado con el láser morado que se discutió previamente.

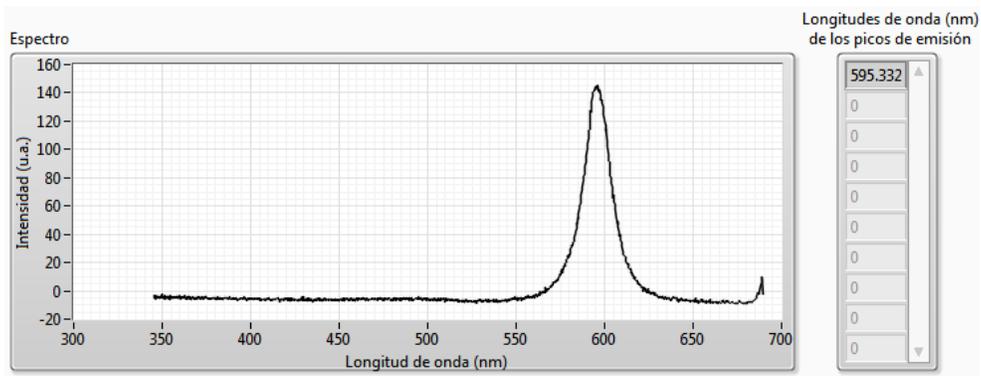


Fig. 51. Espectro de LED amarillo medido en espectrómetro construido.

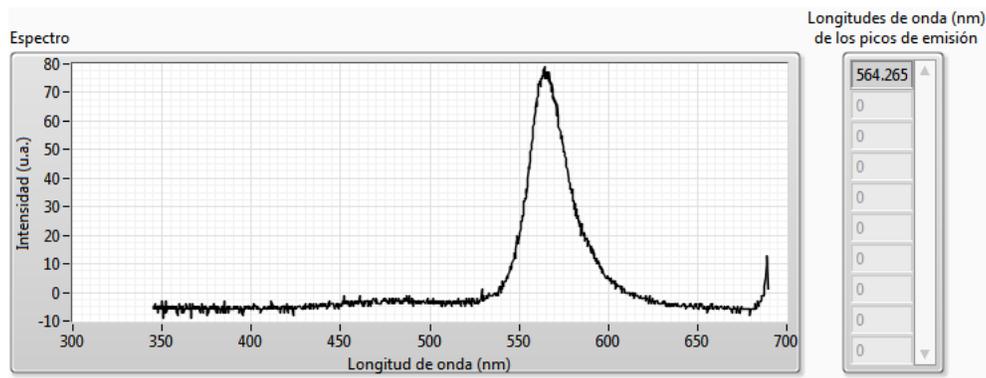


Fig. 52. Espectro de LED verde medido en espectrómetro construido.

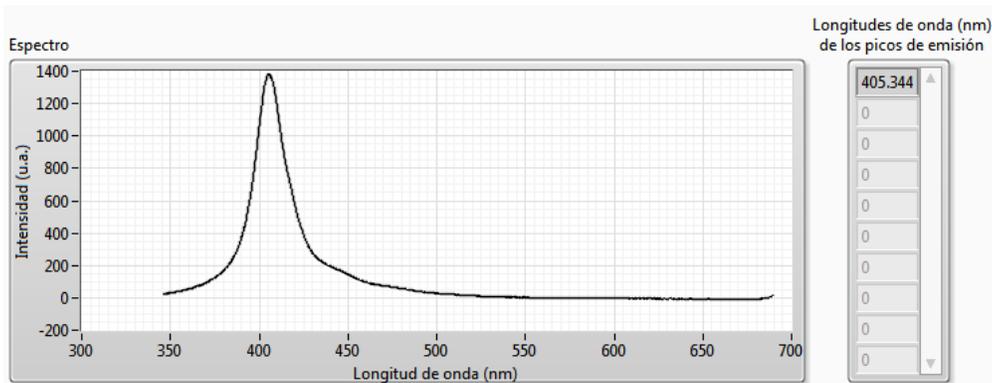


Fig. 53. Espectro de LED morado medido en espectrómetro construido.

## 2.10. Resolución espectral

Como se explicó en la sección 1.3, la anchura de la rendija del espectrómetro es uno de los factores cruciales para determinar su resolución, entre más pequeña sea la rendija mejor resolución se puede alcanzar, pero obviamente menos luz entrará al espectrómetro.

Se diseñaron rendijas a partir de navajas de afeitar, de diferentes tamaños para el espectrómetro pero se terminó utilizando aquella que dejaba pasar suficiente luz y que hiciera angostos los picos de emisión de los espectros observados, para determinar su

anchura fue observada con un microscopio que nos ofrece una escala, en la figura 54 se podemos ver la rendija que se le instaló al espectrómetro y en la figura 55 otra rendija que fabricamos pero que no usamos porque disminuía considerablemente la intensidad de la señal analizada.

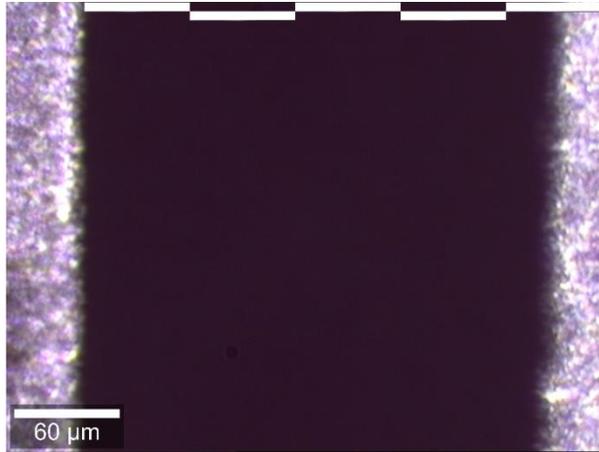


Fig. 54. Rendija de aproximadamente 270 μm, las barras blancas en la parte superior representan 60 μm cada una, como lo indica la escala.

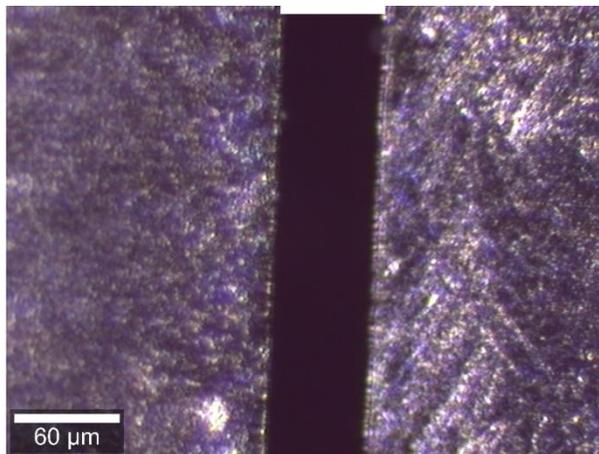


Fig. 55. Rendija de aproximadamente 60 μm, la barra blanca en la parte superior representa 60 μm como lo indica la escala.

La ecuación 5 nos brinda una aproximación de la resolución espectral que el espectrómetro debe tener al sustituir los valores en la misma obtenemos lo siguiente:

$$\delta\lambda = \frac{1.5 \times 327.3nm \times 270000nm}{1348pixel \times 8000nm/pixel} = 12.3 \text{ nm} \quad (Ec.13)$$

A este valor de 12.3 nm lo llamaremos resolución espectral teórica, puesto que también podemos determinar una resolución espectral experimental por medio de los espectros medidos, para determinarla observaremos el rango de longitudes de onda 530 a 600 nm de los espectros de la lámpara de mercurio obtenidos en el espectrómetro comercial y el espectrómetro construido, mencionados en la sección 2.7. La lámpara de mercurio tiene dos

picos de emisión que se encuentran bastante juntos en 577 y 579.1 nm, es decir que nos los podríamos resolver con un espectrómetro de una resolución mayor a 2 nm. En la figura 56 podemos observar estos dos picos de la lámpara de mercurio, que son identificados en las posiciones 578.1 y 580.2 nm, además de que necesitamos un mínimo de 3 pixeles para poder resolver los picos, por lo tanto podemos calcular su resolución espectral experimental y la presentamos en la tabla 10.

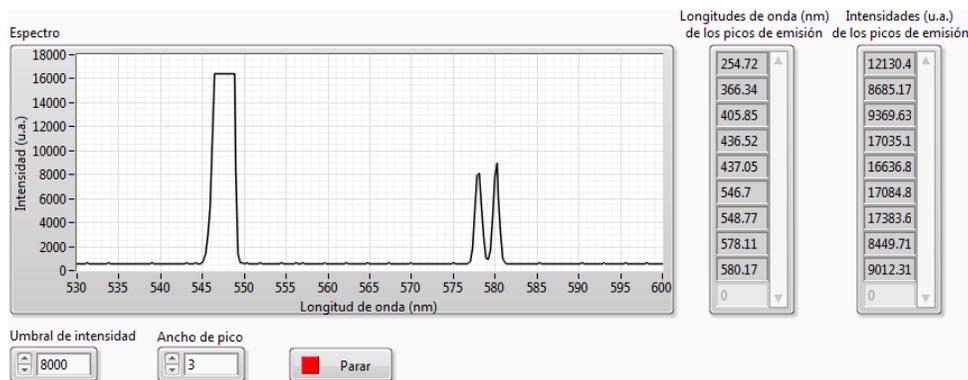


Fig. 56. Región de 530 a 600 nm del espectro de la lámpara de mercurio, medido en el espectrómetro comercial.

Nanómetros por pixel	Pixeles para detectar un pico de emisión	Resolución espectral experimental (nm)
0.3	3	0.9

Tabla 10. Resolución espectral experimental del espectrómetro comercial.

Al observar la figura 57, es fácil ver que los picos del 577 y 579.1 nm no son resueltos por el espectrómetro que construimos, se aprecia como si fuera solamente un pico de emisión centrado en el 578.6 nm. Su resolución espectral experimental se presenta en la tabla 11.

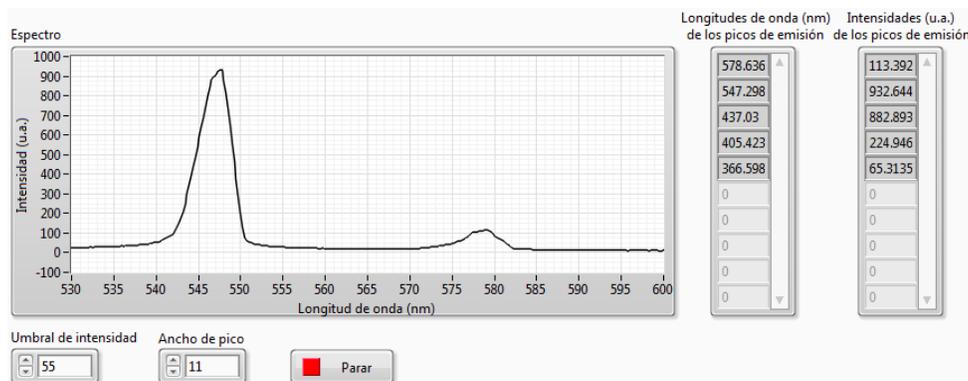


Fig. 57. Región de 530 a 600 nm del espectro de la lámpara de mercurio, medido en el espectrómetro construido.

Nanómetros por pixel	Pixeles para detectar un pico de emisión	Resolución espectral experimental (nm)
0.3	11	3.3

Tabla 11. Resolución espectral experimental del espectrómetro construido.

## 2.11. Señales de control

Para verificar que el programa cargado en la FPGA generaba las señales de control deseadas estas fueron medidas en un osciloscopio. La figura 58 muestra las señales SH y M (de master), como podemos ver SH permanece en alto durante 4 ciclos de M y este tiene una frecuencia de 892 kHz, lo cual es congruente con la programación realizada. La figura 59 expone las señales ICG y M, ICG dura 15 ciclos del reloj principal en estado bajo.

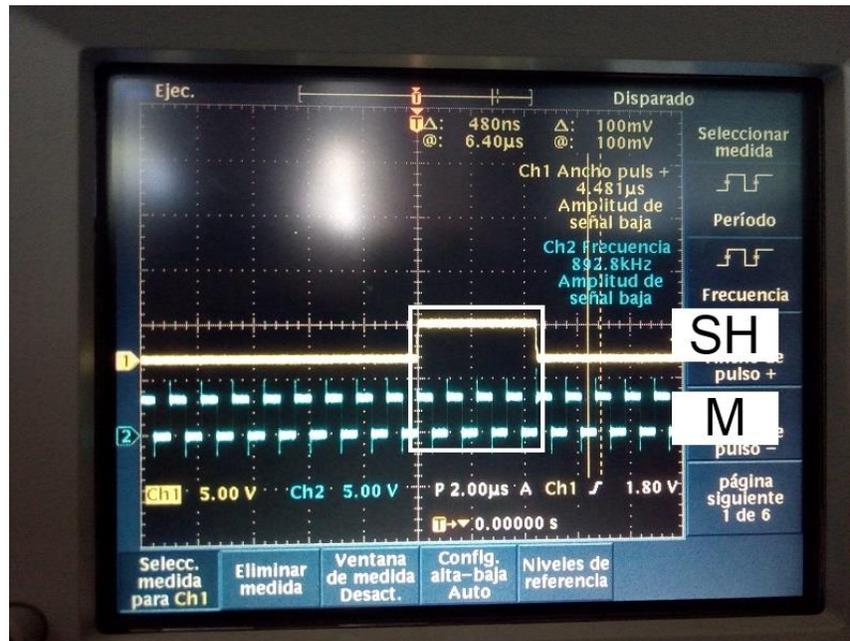


Fig. 58. Señales SH y M desplegadas en el osciloscopio.

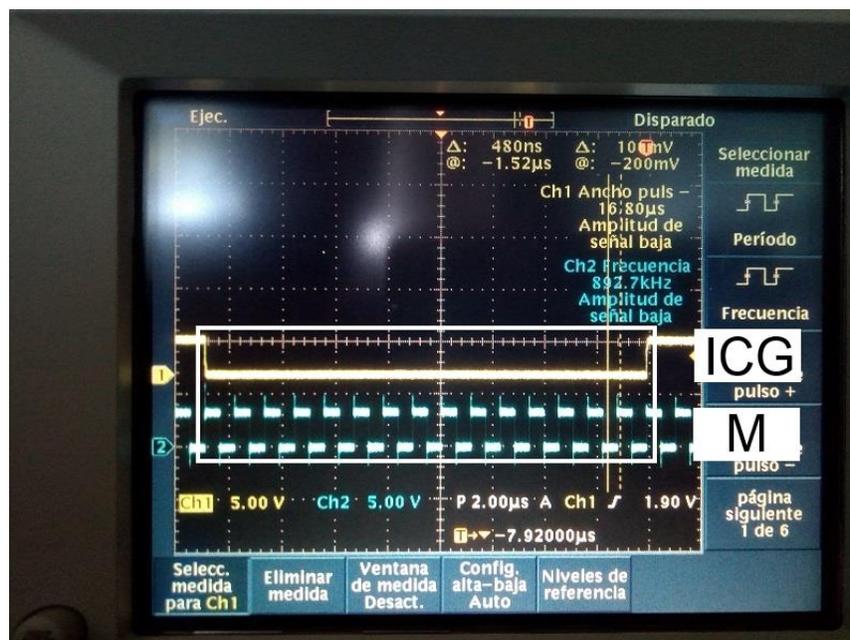


Fig. 59. Señales ICG y M desplegadas en el osciloscopio.

## 2.12. Comparación con el espectrómetro USB4000 de Ocean Optics

Para definir si se lograron alcanzar los objetivos planteados con este trabajo, comparamos las características del espectrómetro que se construyó, con el espectrómetro que se utilizó como referencia para armar nuestro propio diseño, el USB4000 Ocean Optics. La comparación se muestra en la tabla 12, y además se discute cada uno de las características en los párrafos siguientes:

1. Dimensiones: el espectrómetro que diseñamos es casi el doble de grande que el USB4000, sin embargo existen otros espectrómetros de dimensiones similares que todavía son considerados espectrómetros miniatura, por lo cual podemos decir que sí es un espectrómetro portable.
2. Resolución espectral: no se logró superar la resolución espectral de los espectrómetros comerciales como el USB4000. Sin embargo la resolución de 3.3 nm sí se encuentra dentro del rango de resolución espectral que los fabricantes de espectrómetros ofrecen.
3. Selección de rango espectral: los espectrómetros comerciales miniatura usualmente no cuentan con la característica de que una vez armados, se pueda seleccionar la región del espectro en la cual se busca hacer una medición, sin embargo en nuestro instrumento permite medir el espectro visible; además si se rota la rejilla de difracción, aproximadamente hasta 250 nm en la región ultravioleta o 850 nm en la región infrarrojo cercano.
4. Tiempo de adquisición: el espectrómetro es bastante lento, sobre todo si se toma en cuenta que utiliza un procesador, recientemente la compañía Ocean Optics sacó al mercado su espectrómetro OCEAN FX, el cual presume hacer 4500 escaneos por segundo debido a que este nuevo espectrómetro cuenta con un procesador. La limitante para alcanzar menores tiempos de adquisición se encuentra en que el convertidor ADC de la DE0-Nano, no puede digitalizar a una mayor velocidad.
5. Comunicación USB: este aspecto sí se pudo imitar de los espectrómetros comerciales, además también imita el hecho de que el puerto USB provee la energía para hacer funcionar la electrónica del espectrómetro, al conectarlo a una computadora.
6. Interfaz de usuario: el diseño de la interfaz del usuario es muy limitada, puesto que solamente permite visualizar el espectro, determinar la posición de sus picos de emisión y guardar las lecturas realizadas. El software comercial como el OceanView, cuenta con una mayor cantidad de herramientas para que el usuario pueda hacer adecuadas mediciones espectrales.

Espectrómetro	Construido	USB4000
Dimensiones	144.8mm × 116.0mm × 79.0mm	84.1mm × 63.3mm × 34.4mm
Resolución espectral (nm)	3.3	0.1-10.0
Selección de rango espectral (ajustable)	Sí	No
Tiempo de adquisición de una lectura de espectro	1 segundo	Desconocida
Comunicación USB	Sí	Sí
Interfaz de usuario	Instrumento virtual Espectro	OceanView

Tabla 12. Comparación de las características del espectrómetro construido y el USB4000.

# Conclusiones

1. Se diseñó el software en VHDL para programar un FPGA que controla una cámara CCD, digitaliza la señal proveniente de sus primeros 1348 píxeles por medio de un convertidor ADC, transmitir y recibir información a través de un Convertidor Serial ↔USB hacia una computadora personal.
2. Se desarrolló un banco óptico impreso en 3D para las posiciones de los elementos ópticos de un espectrómetro (rendija, espejos, rejilla de difracción), el banco tiene las características de ser compacto y ajustable en el rango espectral. De tal forma que facilita la construcción del espectrómetro.
3. Se construyó un espectrómetro óptico comunicado por USB con un rango espectral de 333.1 a 660.5 nm y una resolución espectral de 3.3 nm, utilizando una cámara CCD controlada por un FPGA.
4. Se programó en LabVIEW software para recibir la señal digitalizada del CCD, reconstruir la señal, calibrarla y visualizarla como un espectro, además de poder analizar las posiciones e intensidades de los picos de un espectro de emisión. También se crearon las aplicaciones necesarias para guardar los espectros analizados y volverlos a desplegar una vez que se ha terminado alguna medición.

# Recomendaciones

1. La tarjeta DE0-Nano tiene integrada una memoria RAM (Random Access Memory), por lo que lo ideal sería guardar los datos digitalizados de cada píxel del CCD en esta y no guardarlos en una memoria simulada en el FPGA, como se hizo en este trabajo, dado que la memoria RAM tiene una mayor capacidad de almacenaje.
2. Una de las limitantes de la velocidad a la que se puede utilizar el espectrómetro es el convertidor ADC de la tarjeta DE0-Nano, el cual resulta “lento” comparado con las velocidades a las que pueden digitalizar con espectrómetros comerciales, por lo cual podría optarse por otro convertidor ADC.
3. Utilizar una rendija comercial para mejorar el desempeño del espectrómetro, dado que resultan de mejor calidad que la uno puede construir con dos navajas de afeitarse, pues tienen un ancho bien definido.

# Bibliografía

- [1] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). Física para ciencias e ingeniería (7ta ed., Vol. 2). México, D.F.: CENGAGE Learning.
- [2] Stoner, J. O., Hurst, G. S., Graybeal, J. D., & Chu, S. (2017, Junio 07). Spectroscopy. Encyclopaedia Britannica [versión electrónica] Encyclopaedia Britannica, inc., <https://www.britannica.com/science/spectroscopy>
- [3] The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2009, Abril 01). Spectrometer. Encyclopaedia Britannica [versión electrónica] Encyclopaedia Britannica, inc., <https://www.britannica.com/science/spectrometer>
- [4] Lindon, J. C., Tranter, G. E., & Holmes, J. L. (2000). Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry (1st ed., Vol. 1). San Diego: Academic Press.
- [5] Joseph-von-Fraunhofer. Recuperada Octubre 1, 2017, desde <https://www.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer/profil-struktur/geschichte-fraunhofer/joseph-von-fraunhofer.html>
- [6] Perez Moret, Yohan.(2012) Diseño y construcción de un espectrómetro óptico por USB. LULU.
- [7] USB4000 Optical Bench Options. Recuperada Octubre 1, 2017 desde <https://oceanoptics.com/product-details/usb4000-optical-bench-options>
- [8] Step-Index Multimode Fiber Optic Patch Cables: SMA to SMA. Recuperada Octubre 1, 2017, desde [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=351](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=351)
- [9] M93L01 - Ø1500 µm, 0.39 NA, Stainless Steel SMA-SMA Fiber Patch Cable, High OH, 1 Meter. Recuperada Octubre 1, 2017 desde [https://www.thorlabs.com/\\_sd.cfm?fileName=TTN037810-E0W.pdf&partNumber=M93L01](https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=TTN037810-E0W.pdf&partNumber=M93L01)
- [10] Part 1: The Slit. Recuperada Octubre 1, 2017, desde <http://bwtek.com/spectrometer-part-1-the-slit/>
- [11] Part 5: Spectral Resolution. Recuperada Octubre 1, 2017 desde <http://bwtek.com/spectrometer-part-5-spectral-resolution/>
- [12] Hecht, E. (1998). Optics (3rd ed.). Reading, MA: Addison-Wesley.
- [13] 1" Dia, 2" FL UV Enhanced Alum., Spherical Mirror. Recuperada Octubre 1, 2017 desde <https://www.edmundoptics.com/optics/optical-mirrors/focusing-concave-mirrors/1quot-dia-2quot-fl-uv-enhanced-alum.-spherical-mirror/>
- [14] Loewen, E. G., & Popov, E. (1997). Diffraction gratings and applications. New York: Marcel Dekker.
- [15] 1200 Grooves/mm, 12.7mm Square, UV Holographic Grating. Recuperada Octubre 1, 2017 desde <https://www.edmundoptics.com/optics/gratings/1200-groovesmm-12.7mm-square-uv-holographic-grating/>
- [16] 1" Dia, 1" FL UV Enhanced Alum., Spherical Mirror. Recuperada Octubre 1, 2017 desde <https://www.edmundoptics.com/optics/optical-mirrors/focusing-concave-mirrors/1quot-dia-1quot-fl-uv-enhanced-alum.-spherical-mirror/>

- [17] Application Notes and Technical Articles. Recuperada Octubre 1, 2017 desde [http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38OSE/c2\\_all.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38OSE/c2_all.pdf)
- [18] TCD1304DG Datasheet. Recuperada Octubre 1, 2017 desde <http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/137658/TOSHIBA/TCD1304DG.html>
- [19] Hernández de Torres, Julio Cesar. Diseño óptico y electrónico de un espectrómetro digital basado en un dispositivo lineal de carga acoplada. Tesis Maestría en Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí: Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, 2012.
- [20] Módulo PL2303 Conversor USB a TTL. Recuperada Noviembre 3, 2017 desde <http://www.naylampmechatronics.com/conversores-ttl/40-modulo-pl2303-convertidor-usb-a-ttl-.html>
- [21] DE0-Nano Development and Education Board. Recuperada Noviembre 3, 2017 desde <http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=593>
- [22] Using the DE0-Nano ADC Controller. Recuperada Noviembre 3, 2017 desde [ftp://ftp.altera.com/up/pub/Altera\\_Material/14.0/Tutorials/DE0-Nano/Using\\_DE0-Nano\\_ADC.pdf](ftp://ftp.altera.com/up/pub/Altera_Material/14.0/Tutorials/DE0-Nano/Using_DE0-Nano_ADC.pdf)
- [23] Quartus II. Recuperada Noviembre 3, 2017 desde [https://es.wikipedia.org/wiki/Quartus\\_II](https://es.wikipedia.org/wiki/Quartus_II)
- [24] LabVIEW. Recuperada Noviembre 3, 2017 desde <http://www.ni.com/es-mx/shop/labview/buy-labview.html>

# Anexos

## A. Código del bloque ControlCCD

```
-- ControlCCD.vhd
-- Esdras Terranova Azuara Juarez
-- 1 de junio de 2017
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_arith.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;

entity ControlCCD IS
port(
clock          : in std_logic;
reinicio       : in std_logic;

icg            : out std_logic;
master         : out std_logic;
sh            : out std_logic;
muestra       : out std_logic
);

end entity;

architecture arq of ControlCCD is

--Senales del primer proceso (divisor_de_frecuencia_master)
signal reloj_master: std_logic;
signal ciclos_master : integer range 0 to 27 := 0;

--Senales del segundo proceso (relojes_de_control)
signal reloj_icg : std_logic;
signal reloj_sh : std_logic;
signal reloj_muestra : std_logic;
signal pixeles_activos : std_logic;
signal ciclos_periodo : integer range 0 to 14791 := 0;
signal ciclos_muestra: integer range 0 to 9 := 0;

begin

--Este proceso crea el baudaje a traves de un divisor de frecuencia:
--[ (50MHz/892857Hz)/2]-1=27 ciclos
divisor_de_frecuencia_master: process (clock, reinicio)begin

if(reinicio = '0')then
reloj_master <= '0';
ciclos_master <= 0;
elsif rising_edge(clock)then

    if (ciclos_master = 27)then
reloj_master <= not(reloj_master);
ciclos_master <= 0;
    else
ciclos_master <= ciclos_master + 1;
    end if;

end if;

end process;

--Este proceso genera los adicionales necesarios para controlar el CCD y el ADC
relojes_de_control:process(reloj_master,reinicio)begin

if(reinicio='0')then
reloj_icg <='1';
reloj_sh<='0';
```

```

pixeles_activos<='0';
reloj_muestra<='0';
ciclos_periodo<=0;
ciclos_muestra<=0;
elsif(rising_edge(reloj_master))then

if(ciclos_periodo>=1 and ciclos_periodo<5) then
reloj_sh <= '1';
else
reloj_sh <= '0';
end if;

if (ciclos_periodo >= 0 and ciclos_periodo < 15)then
reloj_icg <= '0';
else
reloj_icg <= '1';
end if;

if(ciclos_periodo >= 143 and ciclos_periodo < 14735 )then
pixeles_activos <= '1';

    if(ciclos_muestra=1)then
reloj_muestra<='1';
else
reloj_muestra<='0';
end if;

else
pixeles_activos <= '0';
reloj_muestra<='0';
end if;

if (ciclos_periodo = 14791)then
ciclos_periodo <= 0;

    if(ciclos_muestra<1)then
ciclos_muestra<=ciclos_muestra+1;
end if;

else
ciclos_periodo <= ciclos_periodo + 1;
end if;

end if;
end process;

icg<=reloj_icg;
master<= reloj_master;
sh <= reloj_sh;
muestra<=reloj_muestra;

end arq;

```

## B. Código del bloque ADC

```

-- ADC.vhd
-- Esdras Terranova Azuara Juarez
-- 1 de junio de 2017
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_arith.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;

entity ADC is

port (
clock           :in std_logic;
muestra        :in std_logic;

```

```

adc_sdat                                     :in std_logic;

nuevodato                                   :out std_logic;
dato                                         :out std_logic_vector(11 downto 0);
adc_sckl                                     :out std_logic;
adc_saddr                                   :out std_logic;
adc_cs_n                                    :out std_logic

);

end entity;

architecture arq of ADC is

--Senales del primer proceso (divisor_de_frecuencia_sckl)
signal sckl: std_logic;
signal ciclos : integer range 0 to 6 := 0;

--Senales del segundo proceso (shift_register)
signal dato_temp : std_logic_vector (15 downto 0);

--Senales del tercer proceso (digitalizacion)
signal digitalizado : std_logic;

begin

--Este proceso crea el reloj para el ADC sckl a traves de un divisor de frecuencia:
--[ (50MHz/35712428Hz)/2]-1=6 ciclos
divisor_de_frecuencia_sckl: process (clock, muestra)begin

if(muestra = '0')then
sckl <= '0';
ciclos <= 0;
elsif rising_edge(clock)then

    if (ciclos = 6)then
sckl <= not(sckl);
ciclos <= 0;
else
ciclos <= ciclos + 1;
end if;

end if;

end process;

--Este proceso ordena los bits de la digitalizacioin realizada por el ADC
shift_register:process(sckl,muestra)begin

if rising_edge(sckl) then

    if (muestra = '0') then
dato_temp <= (others => '0');
else
dato_temp(0) <= adc_sdat;
dato_temp(1) <= dato_temp(0);
dato_temp(2) <= dato_temp(1);
dato_temp(3) <= dato_temp(2);
dato_temp(4) <= dato_temp(3);
dato_temp(5) <= dato_temp(4);
dato_temp(6) <= dato_temp(5);
dato_temp(7) <= dato_temp(6);
dato_temp(8) <= dato_temp(7);
dato_temp(9) <= dato_temp(8);
dato_temp(10) <= dato_temp(9);

```

```

        dato_temp(11) <= dato_temp(10);
        dato_temp(12) <= dato_temp(11);
        dato_temp(13) <= dato_temp(12);
        dato_temp(14) <= dato_temp(13);
        dato_temp(15) <= dato_temp(14);
    end if;
end if;

end process;

--Este proceso hace el conteo de en que bit esta localizada la digitalizacion del ADC
digitalizacion:process(sckl)
variable indice_bit : integer range 0 to 16;
begin

if rising_edge(sckl) then

    if (muestra = '0') then
        indice_bit := 0;
        digitalizado <= '0';
    else
        indice_bit := indice_bit + 1;

        if (indice_bit= 16) then
            digitalizado <= '1';
            indice_bit := 0;
        else
            digitalizado <= '0';
        end if;

    end if;

end if;

end if;

end process;

--Este proceso marca cuando hay un nuevo valor digitalizado listo para entregarse
salida:process(digitalizado)
begin

if rising_edge(digitalizado) then

dato<=dato_temp(11 downto 0);

end if;

end process;

adc_sckl<= sckl;
adc_saddr<='0';
adc_cs_n<=not(muestra);
nuevodato<=digitalizado;

end arq;

```

### **C. Código del bloque Transmisor**

```

-- Transmisor.vhd
-- Esdras Terranova Azuara Juarez
-- 1 de junio de 2017
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity Transmisor is

port (

```

```

clock          : in std_logic;
reinicio       : in std_logic;
nuevodato      : in std_logic;
dato           : in std_logic_vector(11 downto 0);
enviar         : in std_logic;

tx             : out std_logic

);

end entity;

architecture arq of Transmisor is

--Senales del primer proceso (divisor_de_frecuencia_baudaje)
signal baudaje: std_logic;
signal ciclos : integer range 0 to 216 := 0;

--Senales del segundo proceso (llenado_de_memoria)
type memoria is array ( 0 to 1347) of std_logic_vector( 11 downto 0 );
signal bufer: memoria;
signal direccion: integer range 0 to 1348 := 0;

--Senales del tercer proceso (transmision)
type mensaje is array ( 0 to 1) of std_logic_vector( 7 downto 0 );
signal caracter: mensaje;
signal indice_caracter : integer range 0 to 4 := 0;
signal caracteres_enviados : integer range 0 to 1348 := 0;
signal indice_bit : integer range 0 to 10:=0;
signal terminal_tx: std_logic:='1';

begin

--Este proceso crea el baudaje a traves de un divisor de frecuencia:
--[ (50MHz/115200)/2]-1=216 ciclos
divisor_de_frecuencia_baudaje: process (clock, reinicio)begin

if(reinicio = '0')then
baudaje <= '0';
ciclos <= 0;
elsif rising_edge(clock)then

    if (ciclos = 216)then
baudaje <= not(baudaje);
ciclos <= 0;
    else
ciclos <= ciclos + 1;
    end if;

end if;

end process;

--Este proceso carga en la memoria los primeros 1348 pixeles digitalizados del CCD
llenado_de_memoria:process(nuevodato,reinicio)begin

if(reinicio='0')then
direccion<=0;
elsif(rising_edge(nuevodato))then

    if(direccion<1348)then
bufer(direccion)<=dato;
direccion<=direccion+1;
    end if;

end if;

end process;

--Este proceso transmite toda la informacion que se encuentra en la memoria

```

```

transmision :process (baudaje,reinicio)begin

caracter(0)<="01" & bufer(caracteres_enviados)(5 downto 0);
caracter(1)<="01" & bufer(caracteres_enviados)(11 downto 6);

if(reinicio='0')then
indice_bit<=0;
indice_caracter<=0;
caracteres_enviados<=0;
terminal_tx<='1';
elsif (rising_edge(baudaje) and enviar='1'and caracteres_enviados<direccion)then

    if(indice_caracter<2)then

        if (indice_bit = 0) then
terminal_tx <= '0';
        elsif((indice_bit > 0) and (indice_bit < 9)) then
terminal_tx <= caracter(indice_caracter)(indice_bit-1);
        elsif(indice_bit = 9) then
terminal_tx <= '1';
        elsif(indice_bit > 9) then
terminal_tx <= '1';
        end if;

        indice_bit<=indice_bit+1;

        if(indice_bit = 10) then
indice_bit<=0;
        indice_caracter<=indice_caracter+1;

        end if;

        elsif(indice_caracter=2)then
indice_caracter<=0;
        caracteres_enviados<=caracteres_enviados+1;
        end if;

    end if;

end process;

tx<=terminal_tx;
end arq;

```

## D. Código del bloque Receptor

```

-- Receptor.vhd
-- Esdras Terranova Azuara Juarez
-- 18 de noviembre de 2017
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.ALL;
use ieee.numeric_std.all;

entity Receptor is

port (
clock      : in  std_logic;
rx         : in  std_logic;

comando    : out std_logic;
reinicio   : out std_logic;
ascii      : out std_logic_vector(7 downto 0)
);

end entity;

architecture arq of Receptor is

```

```

--Senales del primer proceso (muestreo)
signal registro_rx : std_logic := '0';
signal datos_rx    : std_logic := '0';

--Senales del segundo proceso (recepcion)
type estados is (espera, inicio, datos,parada, limpieza);
signal estado : estados := espera;
signal contador : integer range 0 to 433 := 0;
signal indice_bit : integer range 0 to 7 := 0; -- 8 Bits
signal byte      : std_logic_vector(7 downto 0) := (others => '0');

begin

--Este proceso hace un doble registro de los datos recibidos (para eliminar problemas de
metaestabilidad)
muestreo : process (clock)begin

if rising_edge(clock) then
registro_rx <= rx;
datos_rx    <= registro_rx;
end if;

end process;

-- Este proceso controla la maquina de estados
recepcion : process (clock)begin

if rising_edge(clock) then

    case estado is

        when espera =>
            contador <= 0;
            indice_bit <= 0;

            if datos_rx= '0' then
                estado<= inicio;
            else
                estado <= espera;
            end if;

        when inicio =>

            if contador = 433/2 then

                if datos_rx = '0' then
                    contador <= 0;
                    estado <= datos;
                else
                    estado <= espera;
                end if;

            else
                contador <= contador + 1;
                estado <= inicio;
            end if;

        when datos =>

            if contador < 433 then
                contador <= contador + 1;
                estado <= datos;
            else
                contador <= 0;
                byte(indice_bit) <= datos_rx;
            end if;
    end case;
end if;
end process;

```

```

                if indice_bit < 7 then
indice_bit <= indice_bit + 1;
estado <= datos;
else
indice_bit <= 0;
estado <= parada;
end if;

                end if;

                when parada =>

                        if contador < 433 then
contador <= contador + 1;
estado <= parada;
else
contador <= 0;
estado <= limpieza;
end if;

                when limpieza =>
estado<= espera;

                when others =>
estado<= espera;

                end case;

end if;

end process;

ascii <= byte;

--Este proceso determina las ordenes a realizar dependiendo del byte recibido:
--El comando '?' (sin comillas en ASCII: 00111111) hace el envio de informacion que esta en
el Transmisor
--El comando 'R' (sin comillas en ASCII: 01010010) hace que CCD y Transmisor se reinicien
ordenes:process(byte)begin

        if(byte="00111111")then
comando<='1';
reinicio<='1';
elsif(byte="01010010")then
comando<='0';
reinicio<='0';
else
comando<='0';
reinicio<='0';
end if;

end process;

end arq;

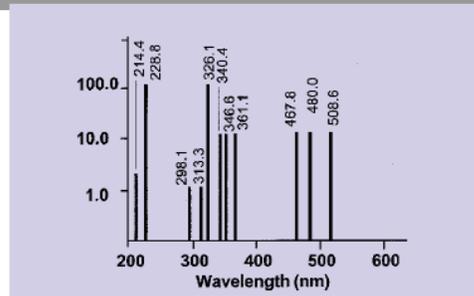
```

## E. Información del fabricante de la UVP Pen-ray 90001201

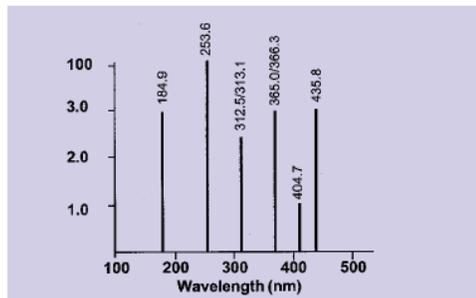
### PEN-RAY LAMP SPECTRA

#### Lamp Spectra

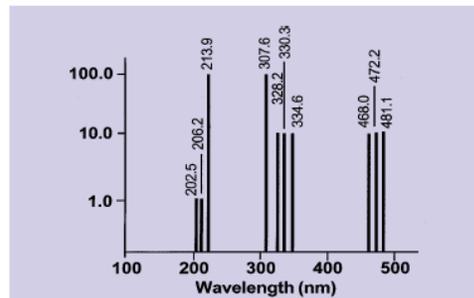
The following graphs illustrate the relative emission intensities of the various Pen-Ray Lamp types through untreated quartz material. A more detailed and exact representation can be obtained by requesting the Rare Gas Spectra Bulletin from UVP.



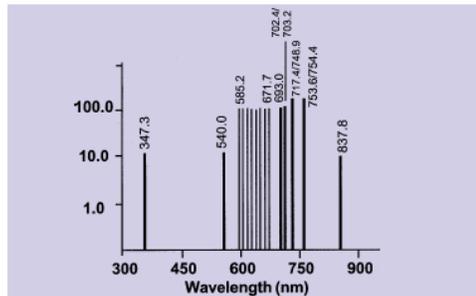
CADMIUM SPECTRUM



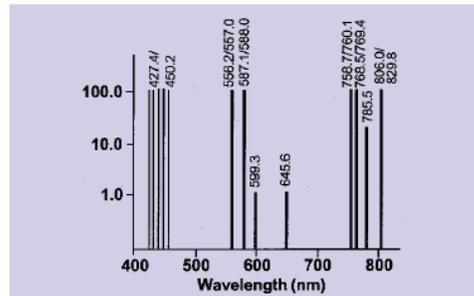
MERCURY SPECTRUM



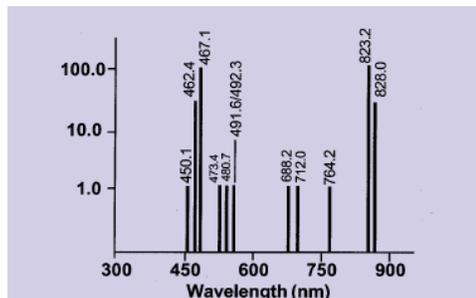
ZINC SPECTRUM



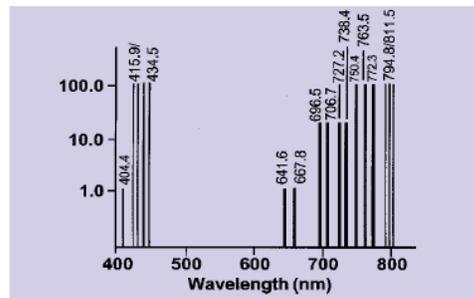
NEON SPECTRUM



KRYPTON SPECTRUM



XENON SPECTRUM



ARGON SPECTRUM



UVP in the USA: (800) 452-6788 or (909) 946-3197; In the UK: +44(0)1223 420022

uvp.com

### Useful Wavelengths With PEN-RAY® Lamps

Table I

(Air or N <sub>2</sub> )	Lamp	(Air or N <sub>2</sub> )	Lamp	(Air or N <sub>2</sub> )	Lamp
		4319.6	Kr		
1849.1	Hg	4333.6	A	6717.0	Ne
1941.7	Hg	4358.4	Hg	6929.5	Ne
2262.2	Hg	4362.6	Kr	6965.4	A
2378.3	Hg	4376.1	Kr	7024.1	Ne
2482.0	Hg	4387.6	He	7032.4	Ne
2536.5	Hg	4453.9	K	7059.1	Ne
2652.0	Hg	4463.7	K	7065.2	He
2803.5	Hg	4471.5	He	7067.2	A
2893.6	Hg	4502.4	K	7173.9	Ne
2967.3	Hg	4713.1	He	7245.2	Ne
3021.5	Hg	4921.9	He	7272.9	A
3125.7	Hg	5015.7	He	7281.4	He
3131.7	Hg	5047.7	He	7384.0	A
3187.7	He	5330.8	Ne	7438.9	Ne
3341.5	Hg	5341.1	Ne	7488.9	Ne
3369.9	Ne	5400.6	Ne	7503.9	A
3417.9	Ne	5460.7	Hg	7514.6	A
3447.7	Ne	5562.2	K	7535.8	Ne
3466.6	Ne	5570.3	K	7544.1	Ne
3472.6	Ne	5769.6	Hg	7587.4	K
3520.5	Ne	5790.7	Hg	7601.5	K
3593.5	Ne	5852.5	Ne	7635.1	K
3650.2	Hg	5870.9	K	7685.2	K
3654.4	Hg	5875.6	He	7694.5	K
3663.3	Hg	5881.9	Ne	7723.8	A
3888.7	He	5944.8	Ne	7854.8	K
3949.0	A	5975.5	Ne	7948.2	A
3964.7	He	6030.0	Ne	8006.2	A
4026.2	He	6074.3	Ne	8014.8	A
4044.4	A	6096.2	Ne	8059.5	K
4046.6	Hg	6143.1	Ne	8103.7	A
4077.8	Hg	6163.6	Ne	8104.4	K
4120.8	He	6217.3	Ne	8112.9	K
4158.6	A	6266.5	Ne	8115.3	A
4164.2	A	6304.8	Ne	8190.1	K
4181.9	A	6334.4	Ne	8231.6	Xe
4191.0	A	6383.0	Ne	8263.2	K
4198.3	A	6402.3	Ne	8264.5	A
4200.7	A	6506.5	Ne	8280.1	Xe
4259.4	A	6532.9	Ne	8298.1	K
4272.2	A	6599.0	Ne	8377.6	Ne
4274.0	Kr	6678.2	He	8408.2	A
4300.1	A	6678.3	Ne	8424.6	A