

## Plagiarism Checker X Originality Report



Plagiarism Quantity: 8% Duplicate

Date	martes, marzo 03, 2020
Words	1520 Plagiarized Words / Total 17928 Words
Sources	More than 235 Sources Identified.
Remarks	Low Plagiarism Detected - Your Document needs Optional Improvement.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN "Desarrollo de un sistema espectralizado automatizado". TESIS Que para obtener el grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA PRESENTA: Ing. Iván Zamora Ramírez DIRECTORES DE TESIS: Dr. José Manuel de la Rosa Vázquez Dr. Suren Stolik Isakina Ciudad de México, 2019 II Dedicatoria ... III Agradecimientos ... IV Índice general Dedicatoria ... III Agradecimientos ...

IV Índice general ... V Índice de figuras ... VII Índice de tablas ... XII Resumen ... XIII Abstract ... XIV Hipótesis ... XV Justificación ...

XVI Objetivo General ... XVII Objetivos Particulares ... XVII 1.. Introduccion ... 1 1.1. Espectro electromagnético. ... 1 1.1.1. Intervalo energético del espectro. ... 2 1.1.2. Región visible ... 3 1.1.3. Ultravioleta ... 4 1.2. Espectrometría. ... 5 1.3. Espectrómetro ... 5 1.3.1. Funcionamiento

### Sources found:

Click on the highlighted sentence to see sources.

### Internet Pages

<1% <https://www.sepi.esimez.ipn.mx/electroni>

<1% <https://www.sepi.esimez.ipn.mx/electroni>

<1% <http://quimicafisica.ugr.es/pages/docenc>

<1% <http://cmap.upb.edu.co/rid=1LY5LSNZ6-DT5>

<1% <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123>

<1% [http://fisica.uc.cl/images/Red\\_Difraccio](http://fisica.uc.cl/images/Red_Difraccio)

<1% <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/>

<1% <http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aul>

<1% <https://www.mncn.csic.es/docs/repositori>

<1% <http://webs.ucm.es/info/gioq/fenopt/imag>

<1% <http://www.heurema.com/PDF52.htm>

<1% <https://es.scribd.com/doc/156814167/Cap->

<1% <https://thetuzaro.wordpress.com/tag/mono>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/me>

<1% <https://www.clubensayos.com/Espa%C3%B1ol>

<1% <https://previa.uclm.es/profesorado/ajbar>

<1% <http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/micro>

<1% <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/moto>

<1% <http://www.fao.org/3/ab489s/ab489s03.htm>

del espectrómetro. . . . . 5 1.3.1.1. Ranura de entrada. . . . . 7 1.3.1.2.  
Espejo colimador. . . . . 7 V 1.3.1.3. Red de difracción. . . . . 7 1.3.1.4.  
Detector. . . . . 9 1.4. Monocromador . . . . . 9 1.5.  
Tubo fotomultiplicador . . . . .

10 1.6. Fuentes luminosas. . . . . 10 1.7. Propuesta de sistema. . . . .  
. . . . . 11 1.8. Antecedentes. . . . . 11 2.. Marco Teórico. . . . .  
. . . . . 13 2.1. Monocromador. . . . . 13 2.1.1.  
Motor a pasos. . . . . 17 2.2. Tubo fotomultiplicador. . . . .  
. . . . . 25 2.3. Microcontrolador. . . . .

. . . . . 27 2.4. Interfaz gráfica. . . . . 30 3.. Desarrollo del  
sistema. . . . . 32 3.1. Control del monocromador . . . . .  
. . . . . 32 3.2. Control de la red de difracción. . . . . 35 3.3. Calibración. . . . .  
. . . . . 38 3.3.1. Lámpara de mercurio. . . . . 38 3.3.2. Relación pasos  
a longitud de onda. . . . .

41 3.3.2.1. Curve Fitting Tool. . . . . 44 3.3.3. ADC MCP3202 . . . . .  
. . . . . 48 3.3.4. Potenciómetro digital. . . . . 49 3.4. Intervalo espectral de trabajo del  
sistema. . . . . 51 4.. Mediciones con el sistema . . . . . 53

Bibliografía . . . . . 62 VI Índice de figuras 1.1. Espectro  
electromagnético, enfatizando el espectro visible para el ojo humano [1]. . . . .

. . . . . 1 1.2. Tipos de espectros. [2] . . . . . 2 1.3. Sensibilidad  
del ojo humano ante el espectro electromagnético, [3], [4] . . . . . 4 1.4. Espectro continuo, luz solar [5]. . . . .  
. . . . . 6 1.5. Esquema de un espectrómetro. . . . . 6 1.6. Diagrama  
óptico de los haces a la entrada del monocromador y colimados hacia la red de difracción. [6] . . . . .  
. . . . . 7 1.7.

Redes de difracción, las más comunes son las redes de difracción planas y cóncavas, a las que pueden  
tener otras formas, como convexa o toroidal [7]. . . . . 8 1.8. Diagrama de la incidencia y reflexión del haz sobre  
una red de difracción. a es el ángulo incidente,  $\theta$  el reflejado,  $d$  es la distancia entre cada línea en la red  
de difracción,  $\lambda$  la longitud de onda. [8] . . . . . 9 1.9. Funcionamiento del monocromador. A la  
salida solo se tiene una longitud de onda. [6] . . . . .

10 1.10. Espectro de emisión de una lámpara de mercurio a baja presión. . . . . 11 2.1. Diagramas

<1% <https://blog.bextok.com/tornillo-sin-fin>

<1% <https://spectraservices.com/product/hg-1>

<1% <https://reevolucionestelar.wordpress.com>

<1% <https://es.slideshare.net/santiago1418/e>

<1% <https://issuu.com/joseluigarescor/docs/>

<1% <https://www.uniovi.es/ate/manuel/SEPI>

<1% <http://aliso.pntic.mec.es/~vferna8/recur>

<1% <https://es.slideshare.net/melodygar/ejer>

<1% <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045>

<1% <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM>

<1% <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/1234>

<1% [http://www.el.uma.es/marin/Tema7\\_practic](http://www.el.uma.es/marin/Tema7_practic)

<1% [http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5\\_1er2](http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2)

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% [http://lajpe.org/dec15/4602\\_Gonzalez.pdf](http://lajpe.org/dec15/4602_Gonzalez.pdf)

<1% <https://www.asinea.org.mx/publicaciones/>

<1% <https://quizlet.com/20785466/spectroscop>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/6/9755>

<1% <https://need4bits.wordpress.com/2012/08/>

<1% [https://rmf.smf.mx/pdf/rmf/28/2/28\\_2\\_225](https://rmf.smf.mx/pdf/rmf/28/2/28_2_225)

<1% <https://www.fis.unam.mx/~juarez/mustio.p>

<1% <https://herramientasparatrabajo.com/instr>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Espectrosc>

<1% <https://brmaumu201.wordpress.com/2018/0>

<1% <https://www.astrofisicayfisica.com/2012/>

<1% <https://jazminpalaciosg108.blogspot.com/>

<1% <https://pamelarivas108e4.blogspot.com/20>

<1% <https://www.monografias.com/trabajos84/e>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

ópticos de dos tipos de monocromadores de red de difracción. . . 14 2.2. Difracción producida por un obstáculo, por un orificio grande y un orificio pequeño el cual está en el orden de la longitud de onda [9] . . . . . 15 2.3. Fenómeno de difracción en una rendija. ¿a es el tamaño de la rendija. [10] . 15 2.4. Difracción de la luz con diferentes longitudes de onda. . . . . 16 VII 2.5. Difracción de la luz se aprecia el orden de difracción de diferentes longitudes de onda. . . . .

. . . . . 16 2.6. Esquema de un motor a pasos. Se observan las dos partes principales que le componen. Rotor a la izquierda y estator a la derecha. [11] . . . . . 18 2.7. Giro del rotor en sentido horario. [12] . . . . . 19 2.8. Esquema del circuito integrado L293 . . . . . 22 2.9. Circuito para controlar el motor a pasos con un microcontrolador. . . . . 22 2.10. Circuito utilizando solo dos pines de control. [13] . . . . . 23 2.11. Tarjeta TB6560, control para motores a pasos. [14] . . . . .

. . . 23 2.12. Configuración de la tarjeta TB6560 . . . . . 24 2.13. Esquema de un tubo fotomultiplicador. . . . . 25 2.14. Tubos fotomultiplicadores . . . . .

. 26 2.15. PMTs módulos de la marca Hamamatsu. Están diseñados para diferentes aplicaciones así como para entregar corriente o voltaje a la salida. [15] . . . 26 2.16. Ajuste de sensibilidad del PMT módulo H8249 . . . . . 27 2.17. Sensibilidad y ganancia H8249 . . . . .

. 27 2.18. ADC MCP3202 dos canales, 12 bits comunicación SPI [16] . . . . . 29 2.19. Potenciómetro digital X9C103 [17] . . . . . 30 3.1. Esquema donde se muestran los componentes que se usarán para el sistema desarrollado. . . . . 32 3.2. Monocromador SpectraPro 275 de la compañía Action Research Corporation. Se observa desde una vista superior su exterior, (izquierda) y su interior (derecha). . . . .

33 VIII 3.3. Base del monocromador SpectraPro 275, diseñada para colocar 3 diferentes redes de difracción. . . . . 33 3.4. Fotografía de la base del monocromador con 3 redes de difracción . . . . 34 3.5. Redes de difracción sobre la base y a su vez sobre el tornillo sin fin. . . . . 34 3.6. Información del encoder, la nomenclatura de este indica su funcionamiento [18] . . . . . 36 3.7. . . . . 36 3.7.

Información del cableado del encoder[18] . . . . . 36 3.8. Dimensiones del encoder. [18] . . . . . 37 3.9. Posición cero del sistema, el motor gira hasta que el encoder encuentre la ranura de la posición cero. . . . . 37 3.10. Interfaz gráfica diseñada para inicializar el sistema. . . . . 38 3.11. Espectro del LED amarillo medidos con el sistema propuesto (a) y con el QE65000 (b). . . . . 39 3.12.

<1% <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Espectro>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n>

<1% <http://www.quimitube.com/videos/calculo->

<1% <https://brainly.lat/tarea/9802495>

<1% <https://brainly.lat/tarea/4925915>

<1% <http://www.matesfisicayquimica.es/2bachq>

<1% <https://es.answers.yahoo.com/question/in>

<1% <https://fundacionannavazquez.wordpress.c>

<1% <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123>

<1% <https://www.uv.es/DSSQA/documentacion/ca>

<1% <http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero>

<1% <https://webs.um.es/gregomc/IntroduccionA>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Interacci%C3%B3n>

<1% <https://www.monografias.com/trabajos16/t>

<1% <https://www.buenastareas.com/ensayos/Esp>

<1% <https://es.answers.yahoo.com/question/in>

<1% <http://www.acmor.org.mx/cuam/2009/Fisico>

<1% [https://es.wikipedia.org/wiki/Longitud\\_de\\_onda](https://es.wikipedia.org/wiki/Longitud_de_onda)

<1% [https://es.wikipedia.org/wiki/Haz\\_de\\_luz](https://es.wikipedia.org/wiki/Haz_de_luz)

<1% <https://es.answers.yahoo.com/question/in>

<1% <https://hipertextual.com/archivo/2013/12>

<1% <https://fisiscamoderna8.wordpress.com/se>

<1% <https://w3.ual.es/~migarcia/redesdifracc>

<1% <http://users.df.uba.ar/dcs/f2bg/labo/gui>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Braun](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Braun)

<1% <https://es.slideshare.net/guest955ae8/tr>

<1% <https://parentesis.com/tutoriales/Sensor>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Monocromador>

<1% <https://www.finaltest.com.mx/product-p/a>

Espectro de un LED amarillo. . . . . 39 3.13. Líneas de emisión de la lámpara de Mercurio. Lámpara de Ocean Optics HG-1 Mercury Argón. [8] . . . . . 40 3.14. Espectro medido con el sistema desarrollado, intensidad contra pasos del motor. . . . . 40 3.15. Espectro de emisión del mercurio, se aprecian más de 12 líneas de emisión. Se resaltan las 12 líneas que usaremos para calibrar el sistema desarrollado, [3]. . .

. . . . . 41 3.16. Líneas de emisión del mercurio. Obtenidas por el sistema, su relación es en pasos y no en longitud de onda.) . . . . . 41 3.17. Espectro de la lámpara de mercurio. Se aprecia la repetitividad del sistema. . 42 IX 3.18. Espectro de emisión de la lámpara de mercurio, espectro en intensidad contra pasos. . . . . 43 3.19. Diferencias de pasos en los picos encontrados. . . . . 43 3.20.

Diferencia visible en la medición del espectro de la lámpara de mercurio. Hay dos líneas que no coinciden se decide cuales quitar. . . . . 44 3.21. Espectro de la lámpara de mercurio con y sin filtro, intensidad contra pasos. 44 3.22. Interfaz de curve fitting tool de MATLAB. . . . . 45 3.23. El espectro de emisión de la lámpara de mercurio, adquirido por nuestro sistema y ajustado con la ecuación, color rojo. El asterisco azul son las 12 líneas del espectro de emisión del mercurio. Se aprecia como coinciden estas 12 líneas con el espectro obtenido con el sistema. . .

. . . . . 47 3.24. Espectro de la lámpara de mercurio medido con el sistema. La intensidad está en unidades relativas y la longitud de onda en nanómetros. El sistema ya está calibrado. . . . .

. . . . . 48 3.25. Comparación entre el ADC del Arduino MEGA, izquierda y el ADC MCP3202, derecha. Las dos gráficas están normalizadas. . . . . 48 3.26. Sensibilidad del PMT. . . . . 49 3.27. Comportamiento del potenciómetro digital X9C103 . . . . .

. 50 3.28. Espectro de lámpara de mercurio medido con diferentes sensibilidades del PMT . . . . . 50 3.29. Respuesta espectral de la red de difracción y del PMT, se aprecia que ambos empiezan en los 200nm, y llegan hasta los 800nm pero con sensibilidad mucho menos (PMT) [19] y menor eficiencia (red de difracción. [20]) . . . 51 3.30. Espectro de la lámpara LS-1-CAL de OceanOptics. Usada para calibrar los espectrómetros en potencia.

Su intervalo va desde los 300 nm hasta longitudes de onda mayores a los 1000nm. [21] . . . . . 52 X 3.31. Lámpara de tungsteno-halógeno de OceanOptics, LS-1-CAL. Medida con el sistema desarrollado. Se observa que el sistema comienza a decaer en sensibilidad a partir de los 540nm aproximadamente. Al llegar a los 780nm el sistema es incapaz de medir. . . . . 52 4.1.

<1% [https://www.ecured.cu/Longitud\\_de\\_onda](https://www.ecured.cu/Longitud_de_onda)

<1% <http://www.heurema.com/PDF36.htm>

<1% <https://es.scribd.com/document/391682917>

<1% <https://personales.unican.es/perezvtr/pdf>

<1% <https://sensor-radioactivo.blogspot.com/>

<1% <https://repositorio.unican.es/xmlui/bits>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Aplicacion>

<1% <https://www.monografias.com/trabajos93/a>

<1% <https://es.scribd.com/document/378507306>

<1% <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachmen>

<1% <https://es.slideshare.net/CristianAguirre>

<1% <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/dat>

<1% <https://www.fiscalab.com/ejercicio/1829>

<1% <http://www.rpsqualitas.es/documentacion/>

<1% [https://www.yoquieroaprobar.es/5\\_bachill](https://www.yoquieroaprobar.es/5_bachill)

<1% <https://www.windows2universe.org/physica>

<1% <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045>

<1% <https://webs.ucm.es/info/Astrof/users/ja>

<1% <https://cienciaexplicada.com/rejillas-de>

<1% <https://es.scribd.com/document/268007135>

<1% <https://brainly.lat/tarea/1503989>

<1% <https://es.scribd.com/doc/57114262/Difra>

<1% <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045>

<1% <http://sabina.pntic.mec.es/ocaf0004/docu>

<1% <https://propdelosmaterialestecdetoluca.b>

<1% <https://ar.answers.yahoo.com/question/in>

<1% <http://academic.uprm.edu/jalemar/cap16co>

<1% <https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalogr>

<1% <https://willian-cardona.blogspot.com/201>

<1% <https://www.slideshare.net/JoseManuelCar>

Espectro de la lámpara de mercurio medido con el espectrómetro HR4000. Se utilizan dos tiempos de integración diferentes.

..... 53 4.2. Espectro de la lámpara de mercurio adquirido con el espectrómetro QE65000. Se aprecia cómo se satura en una gran cantidad de líneas. .... 54 4.3. Espectro de la lámpara de mercurio medido con el sistema desarrollado. El monocromador tiene los slits de entrada y salida en su menor apertura, 10  $\mu$ m, y en el máximo de sensibilidad del PMT. .... 54 4.4. Dos de las líneas de emisión de la lámpara de mercurio  $\lambda = 576.96\text{nm}$  y  $579.066\text{nm}$ . Se aprecia que el sistema desarrollado resuelve mejor estas dos líneas de emisión.

..... 55 4.5. Espectro de la lámpara LS-1-CAL ..... 56 4.6. Espectro del LED Ultravioleta 380nm ..... 56 4.7. LED violeta  $\lambda = 400\text{nm}$  ..... 57 4.8. LED rojo  $\lambda = 650\text{nm}$  ..... 57 4.9. LED rojo, de longitud de onda 700nm ..... 57 4.10. Espectro de la lámpara LS-1-CAL y el LED rojo  $\lambda = 700\text{nm}$ . .... 58 4.11. Longitud de onda que se avanza por paso. ....

..... 58 XI Índice de tablas 1.1. Intervalos de longitud de onda en el vacío para los distintos colores. [22] ... 4 1.2. ISO 21348 sección de subcategorías del ultravioleta. [23] ..... 5 2.1. Secuencia para hacer girar un motor a pasos. [12] ..... 20 2.2. Secuencia de paso "doble", se activan dos bobinas a la vez. [12] ..... 20 2.3. Secuencia para medios pasos, se puede avanzar la mitad de un paso. [12] ... 21 2.4. Se muestra la resolución de diferentes ADCs, con un voltaje máximo de entrada de 5 volts. ...

..... 29 2.5. Tabla con las funciones de los pines del ADC MCP3202 [16] ..... 29 2.6. Descripción de los pines del potenciómetro digital. [17] ..... 30 3.1. Picos encontrados con  $\Delta$ ndpeak en las mediciones ..... 42 3.2. Las 12 líneas de emisión de la lámpara de mercurio, en nanómetros y el número de pasos que se encontraron para cada una de estas líneas. .... 45 3.3. Diferentes ajustes obtenidos con curve fitting tool. Varios de estos ajustes tienen una R-square = 1. Por lo que se utiliza el siguiente criterio el RMSE.

Siendo Fourier el mejor ajuste. .... 46 3.4. Comparación de la longitud de las líneas de emisión de la lámpara de mercurio y la ecuación obtenida para encontrar la relación de pasos a longitud de onda (nm). .... 47 XII Resumen La espectroscopia es una técnica de medición para estudiar la interacción de la radiación electromagnética con la materia.

Dentro del amplio espectro electromagnético, el presente trabajo se enfoca en la luz ultravioleta (UV) y la

<1% <http://xml.ier.unam.mx/xml/ms/Doctos/Man>

<1% <http://mural.uv.es/ferhue/1o/Espectroscop>

<1% <https://es.slideshare.net/CesarTenorioSa>

<1% <http://laotraopinion.net/tecnologia/tele>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <https://atilanorene.files.wordpress.com/>

<1% <https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/i>

<1% <https://es.slideshare.net/carlosismaelca>

<1% <https://brainly.lat/tarea/5071096>

<1% <https://www.mecatronicalatam.com/es/tuto>

<1% <http://salvador.maciashernandez.com/Esco>

<1% <https://www.bing.com/aclick?id=e3whDEpj->

<1% <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2>

<1% <https://es.scribd.com/document/281857886>

<1% <https://www.buenastareas.com/materias/l2>

<1% <https://es.scribd.com/doc/117218188/Cont>

<1% <https://es.scribd.com/document/345323139>

<1% <https://www.linguee.com/spanish-english/>

<1% <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/tb65>

<1% <http://www.contraloria.cdmx.gob.mx/docs/>

<1% <https://www.uniovi.es/ate/alberto/TEM>

<1% [http://tallertecnico.com/cursos\\_scratch/c\\_s](http://tallertecnico.com/cursos_scratch/c_s)

<1% [http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/mis0001\\_](http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/mis0001_)

<1% <http://rufianenlared.com/motores-paso-a->

<1% [http://robots-argentina.com.ar/MotorPP\\_b](http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_b)

<1% <https://www.aeeolica.org/uploads/documen>

<1% <https://www.clubensayos.com/Ciencia/Foto>

<1% <https://institutonacional.cl/wp-content/>

<1% <https://brainly.lat/tarea/3241365>

<1% <https://telecomunicaciones-52012.blogspot>

luz visible (VIS). Hoy en día existen en el mercado equipos capaces de realizar espectroscopia óptica, sin embargo, la mayoría tienen costos elevados. Aprovechando equipo de laboratorio con el cual se cuenta, se ha desarrollado un sistema espectroscópico automatizado. El sistema consta de un monocromador SpectraPro 275, un módulo de tubo fotomultiplicador (PMT) y un motor a pasos.

Los cuales serán controlados por un microcontrolador y una PC. El intervalo de trabajo de este espectrómetro es de los 200 hasta los 650nm, con un paso promedio de 0.05nm. La Interfaz gráfica fue diseñada en LabView, se utilizó un microcontrolador para el control y un ADC la adquisición de los datos. XIII Abstract The spectroscopy is a measurement technique to study the interaction of electromagnetic radiation with matter.

Within the broad electromagnetic spectrum, this work will focus on ultraviolet light (UV) and visible light (VIS). Today there are equipment on the market capable of performing optical spectroscopy, however, most of them have high costs. Taking advantage of laboratory equipment that is available, an automated spectroscopic system has been developed. The system consists of a SpectraPro 275 monochromator, a photomultiplier tube (PMT) module and a stepper motor.

Which will be controlled by a microcontroller and a PC. The working range of this spectrometer is from 200 to 650 nm, with an average step of 0.05 nm. The Graphical User Interface (GUI) was designed in LabView, a microcontroller was used to control the system and an ADC to data acquisition. XIV Hipótesis Es posible a partir de un monocromador y utilizando un sistema de motor a pasos y un fotomultiplicador diseñar, construir y caracterizar un espectrómetro automatizado y controlado por una PC.

XV Justificación La línea de investigación de instrumentación fotónica de la SEPI-ESIME-Z cuenta con diversos miniespectrómetros para la realización de sus investigaciones. Estos mini-espectrómetros permiten en principio la captura automática de espectros de luz continua con resoluciones de hasta 0.5 nm. El automatizar un monocromador permitirá realizar, además de espectroscopia de luz continua, espectroscopia resuelta en tiempo y de mucha más alta resolución. Al ser un sistema desarrollado en el propio laboratorio, este podrá ser modificado con facilidad con la finalidad de mejorar sus características o para aplicaciones particulares.

Otro de los beneficios que se obtiene con automatizar el monocromador, es el bajo costo que esto implica en comparación con la compra de un sistema comercial automatizado. Con el sistema propuesto se podrán además: Estudiar fuentes luminosas de baja intensidad. Podrá ser modificado para realizar mediciones en otros intervalos del espectro de luz con el cambio de la rejilla de difracción y el tubo fotomultiplicador. Aplicaciones El monocromador tiene un alto poder de resolución, al combinarlo con un tubo fotomultiplicador

<1% <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4>

<1% <https://www.deustoformacion.com/blog/ges>

<1% <https://unicrom.com/fuente-de-voltaje-va>

<1% <https://es.scribd.com/document/251654963>

<1% <http://www.circuitoselectronicos.org/201>

<1% <https://ciateq.repositorioinstitucional>

<1% <http://www.enfermeriaperu.com/internusa/>

<1% <https://tecnoarduina megaudistral.blogs>

<1% <https://descubrearduino.com/arduino-mega>

<1% <http://fuenteabierta.teubi.co/2013/04/el>

<1% <https://es.slideshare.net/henry1860/8-2->

<1% <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06>

<1% <https://issuu.com/sbasica/docs/matematic>

<1% <https://www.prometec.net/funciones1/>

<1% <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/adc->

<1% <http://panamahitek.com/potenciometro-dig>

<1% <https://cache.industry.siemens.com/dl/fi>

<1% [https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz\\_g](https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz_g)

<1% <https://sdei.unican.es/Paginas/servicios>

<1% <http://www.profesaulosuna.com/data/files>

<1% [https://www.researchgate.net/profile/N\\_F](https://www.researchgate.net/profile/N_F)

<1% [https://html.rincondelvago.com/fisica\\_60](https://html.rincondelvago.com/fisica_60)

<1% <https://html.rincondelvago.com/red-de-di>

<1% <http://almez.pntic.mec.es/jgonza86/siste>

<1% <https://mecanicayautomocion.blogspot.com>

<1% <https://brainly.lat/tarea/7228086>

<1% <https://www.unirioja.es/dptos/dq/fa/emo/>

<1% <https://botscience.wordpress.com/2012/06>

<1% <https://www.monografias.com/trabajos34/e>

<1% <https://www.ocu.org/tecnologia/televisio>

de alta sensibilidad, ser posible medir espectros de emisi3n de los plasmas estudiados en el grupo de instrumentaci3n fotogr3fica.

XVI Objetivo General Dise3ar y construir un espectr3metro de alta resoluci3n utilizando un monocromador, Acton Research Corporation Spectrapro 275, un m3dulo de tubo fotomultiplicador y un motor a pasos.

Objetivos Particulares Dise3ar un sistema para controlar la posici3n angular de la red de difracci3n.

Dise3ar una interfaz gr3fica para controlar el sistema y observar los espectros medidos. Calibrar el espectr3metro utilizando una l3mpara de mercurio. Controlar la ganancia del tubo fotomultiplicador.

Comparar las mediciones del sistema propuesto con los miniespectr3metros de Ocean Optics con los que cuenta la l3nea de instrumentaci3n fotogr3fica de la SEPI- ESIMEZ. XVII Cap3tulo 1 Introducci3n El presente trabajo de tesis est3 dedicado al dise3o, construcci3n e implementaci3n de un sistema automatizado para la realizaci3n de estudios de espectroscopia, utilizando un monocromador como sistema para descomponer la luz en sus diferentes longitudes de onda y un tubo fotomultiplicador (PMT) para medir la intensidad luminosa de cada una.

La espectroscopia 3ptica es una herramienta utilizada para el estudio de la luz absorbida o emitida por la materia. El intervalo del espectro electromagn3tico que se estudiar3 parte de los 200 nm hasta los 650 nm (Ultravioleta medio, ultravioleta cercano y luz visible), ver 3gura 1.1. Figura 1.1: Espectro electromagn3tico, enfatizando el espectro visible para el ojo humano [1]. 1.1. Espectro electromagn3tico. Se denomina espectro electromagn3tico a la distribuci3n energ3tica del conjunto de las ondas electromagn3ticas.

Referido a un objeto se le llama espectro de la radiaci3n electromagn3tica que emite o absorbe el mismo y que se relaciona con su composici3n. Dicha radiaci3n nos brinda informaci3n sobre la materia y sirve para identificar las sustancias, el espectro es 3nico para cada sustancia de manera an3loga a una huella dactilar. En la 3gura 1.2 se observan diferentes espectros y c3mo se producen estos, donde 1 2 CAP3TULO 1. INTRODUCCI3N Figura 1.2: Tipos de espectros. [2] el primero, es el espectro continuo o de cuerpo negro, en el cu3l se observa una banda continua.

Es emitido por cualquier objeto caliente, el espectro solar es un ejemplo de este. El espectro de emisi3n es generado cuando los 3tomos y mol3culas en un gas caliente emiten una radiaci3n en ciertas longitudes de onda. Por otra parte el espectro de absorci3n se observa cuando el mismo gas, recibe radiaci3n electromagn3tica, este gas absorber3a ciertas longitudes de onda. Se observa que las l3neas emitidas son las mismas que las que no se presentan cuando absorbe.

Cumpliendo con esto la ley de Kirchhoff de la radiaci3n t3rmica: si un cuerpo (o super3cie) est3 en

<1% <https://es.scribd.com/document/427782990>

<1% <https://es.scribd.com/document/296745106>

<1% <http://users.df.uba.ar/acha/Lab5/Monocro>

<1% <https://es.slideshare.net/PEDROHERNANDEZ>

<1% <https://aprendiendoarduino.wordpress.com>

<1% [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codig](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codig)

<1% <https://www.ucm.es/data/cont/docs/76-201>

<1% <https://www.ciencia-explicada.com/2011/0>

<1% <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamp>

<1% <https://es.scribd.com/document/376798928>

<1% <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?scri>

<1% <https://www.calameo.com/books/0004821859>

<1% <https://historyabiografias.com/espectro>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <http://www.galeon.com/mcoronado/MODELAMI>

<1% <https://icicm.com/files/CurMSA.pdf>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <https://html.rincondelvago.com/analisis->

<1% <http://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.p>

<1% <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream>

<1% <https://economipedia.com/definiciones/r->

<1% <http://pdfs.wke.es/6/2/8/1/pd0000066281>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Ra%C3%ADz>

<1% <https://es.slideshare.net/LOLFERBUR/tema>

<1% <https://math.stackexchange.com/questions>

<1% <https://espanol.libretxts.org/Qu%C3%ADm>

<1% [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_d](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_d)

<1% <https://html.rincondelvago.com/estadisti>

<1% <https://es.scribd.com/document/422039337>

<1% <https://es.scribd.com/doc/237619925/ejer>



equilibrio termodinámico con su entorno, su emisividad es igual a su absorptividad  $a = e$ . 1.1.1. Intervalo energético del espectro. El espectro electromagnético cubre longitudes de onda muy variadas. Existen frecuencias desde 30 Hz y menores que son relevantes en el estudio de ciertas nebulosas. Por otro lado se conocen frecuencias cercanas a los  $2.9 \cdot 10^{27}$  Hz, que han sido detectadas provenientes de rayos cósmicos. La energía de una onda electromagnética es determinada 1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

3 por su longitud de onda, la cual tiene una frecuencia asociada, y una energía de fotón  $E$ . La relación es la siguiente.  $c = f \lambda$ , o,  $\lambda = c / f$ . La energía de un fotón está dada por la siguiente ecuación.  $E = h f = h c / \lambda$  (1.1)  $h$  constante de Planck,  $h = 6.626069 \cdot 10^{-34}$  J s.  $\lambda$  longitud de onda en (nm).  $f$  frecuencia de la luz (Hz).  $c$  velocidad de la luz en el vacío  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s,  $\epsilon_0 = 8.85418 \cdot 10^{-12}$  C<sup>2</sup>/N m<sup>2</sup> Podemos reescribir la ecuación 1.1,

expresando la energía  $E$  en eV, la longitud de onda ya en nanómetros (nm) y las constantes  $h$  y  $c$ ,  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$  J (eV)  $1240$  (1.2) De modo que para un fotón de longitud de onda igual a 200 nm se tiene una energía de 6.2 eV mientras que para uno de 700 nm la energía será de 1.77 eV.  $E_{200} = 6.2 \text{ eV}$   $E_{700} = 1.77 \text{ eV}$  De la ecuación 1.2 podemos observar la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, a longitudes de onda menores tendremos mayor energía, y a mayor longitud de onda menor energía. Las ondas electromagnéticas se clasifican en: rayos- $\gamma$ , rayos-x, ultravioleta, luz visible, infrarrojos, microondas y ondas de radio. 1.1.2.

Región visible El intervalo de luz visible va desde los 400 nm hasta los 700 nm aproximadamente, se le llama así a esta región por ser el intervalo donde el ojo humano tiene sensibilidad, ver 4 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Figura 1.3: Sensibilidad del ojo humano ante el espectro electromagnético, [3], [4] Tabla 1.1: Intervalos de longitud de onda en el vacío para los distintos colores. [22] Color Longitud de onda (nm) Violeta 380-450 Azul 450-495 Verde 495-570 Amarillo 570-590 Naranja 590-620 Rojo 620-750 Figura 1.3.

La máxima sensibilidad del ojo humano se encuentra a los 555 nm (verde), la respuesta espectral del ojo humano fue establecida por la CIE, Commission internationale de l'éclairage [24]. En la tabla 1.1, se observan los intervalos en longitud de onda para los colores que componen la luz blanca. Newton fue el primero en darse cuenta que la luz blanca está compuesta de todos los colores del espectro visible. 1.1.3. Ultravioleta La luz ultravioleta es el intervalo del espectro electromagnético que va desde los 10 nm hasta los 400 nm, se puede dividir en varios intervalos definidos por la ISO 21348 [23]. En la tabla 1.2 se muestran las subcategorías para el ultravioleta. En este trabajo utilizaremos las subcategorías NUV y MUV (200-400 nm).

<1% <https://forum.arduino.cc/index.php?topic>

<1% <http://automaticausach.cl/ asignaturas/eq>

<1% <https://es.scribd.com/document/384727873>

<1% <https://www.inventable.eu/2012/01/06/ins>

<1% <https://www.tel.uva.es/personales/tri/pr>

<1% <https://www.disfrutalasmatematicas.com/d>

<1% <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM>

<1% <http://www.bun-ca.org/publicaciones/manu>

<1% <https://franklinelinkmx.wordpress.com/20>

<1% <http://www.cenam.mx/sm2016/pdf/1713.pdf>

<1% <https://es.slideshare.net/fisioterapeuta>

<1% <https://prezi.com/yzr1kufzjr6l/ejemplos->

<1% <https://tiendaganadera.com/BOMBILLA-DE-E>

<1% <http://srv2.fis.puc.cl/mediawiki/index.p>

<1% <https://es.wikipedia.org/wiki/Color>

<1% <https://repositorio.cbachilleres.edu.mx/>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <https://www.efdeportes.com/efd147/la-act>

<1% <https://es.khanacademy.org/science/elect>

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <https://www.amazon.es/CRC-Handbook-Chemi>

<1% [http://umpir.ump.edu.my/view/creators\\_al](http://umpir.ump.edu.my/view/creators_al)

<1% <https://www.stellarnet.us/what-is-a-conc>

<1% [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/\\_cuant](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_cuant)

<1% <http://www.uta.edu/utari/acs/2019%2006%2>

<1% <http://diymakers.es/mover-motores-paso-p>

<1% <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/>

<1% <http://ww1.microchip.com/downloads/en/De>

<1% <https://www.edmundoptics.com/p/2400-groo>

<1% <https://www.amazon.com/Handbook-Fundamen>



1.2. ESPECTROMETRÍA. 5 Tabla 1.2: ISO 21348 secciones de subcategorías del ultravioleta. [23]  
 Subcategoría UV Intervalo en nm Descripción. UV 10= 400 Ultravioleta A 315= 400 Ultravioleta A  
 UVB 280= 315 Ultravioleta B UVC 100= 280 Ultravioleta C NUV 300= 400 Ultravioleta cercano MUV  
 200= 300 Ultravioleta medio FUV 122= 200 Ultravioleta lejano H-Lyman-  $\alpha$  121= 122 línea Lyman  $\alpha$   
 VUV 10= 200 Ultravioleta de vacío EUV 10= 121 Ultravioleta extremo. 1.2. Espectrometría.

La interacción de la radiación electromagnética con la materia se puede describir con una representación gráfica de la distribución de intensidad de la radiación electro- magnética, emitida o absorbida, por una sustancia, en función de su longitud de onda. Al analizar la radiación emitida o absorbida por la materia, se pueden identificar sustancias que la componen. 1.3. Espectrómetro El espectrómetro óptico es un dispositivo utilizado para analizar la luz, para esto, el espectrómetro descompone la luz a estudiar en sus diferentes longitudes de onda que la componen, y mide la intensidad luminosa en cada una de estas longitudes de onda.

Con lo cual obtendremos una gráfica de la intensidad contra la longitud de onda. Fig. 1.4 [25]. 1.3.1. Funcionamiento del espectrómetro. El funcionamiento básico del espectrómetro es descomponer la luz en sus componentes espectrales, medir la intensidad de la señal en función de la longitud de onda, y graficar las intensidades medidas en relación con la longitud de onda. El primer paso es introducir la luz al espectrómetro, la luz entra por medio de una fibra óptica, pasando por una pequeña apertura, la ranura de entrada, ver la figura 1.5(a). Aquí la luz diverge, esta luz es colimada utilizando un espejo cóncavo figura 1.5(b) y reflejada hacia la red de difracción figura 1.5(c).

Aquí ocurre el fenómeno de difracción 6 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Figura 1.4: Espectro continuo, luz solar [5]. separando la luz en sus diferentes componentes espectrales, cada componente espectral se refleja en un ángulo diferente, las cuales son enfocadas por un segundo espejo cóncavo figura 1.5(d), al final son proyectadas en el detector figura 1.5(e). La señal luminosa es entonces convertida a una señal eléctrica. Con base en la dispersión lineal de la red de difracción y los píxeles en el detector, el software obtiene la relación en longitud de onda, y así se obtiene un espectro de intensidad en función de la longitud de onda. Figura 1.5: Esquema de un espectrómetro.

Se aprecia como la luz es colimada, refractada y enfocada al sensor CCD [26] 1.3. ESPECTRÓMETRO 7 1.3.1.1. Ranura de entrada. La ranura de entrada o slit de entrada, es la entrada de luz al espectrómetro, aquí es donde se define la cantidad de luz, flujo de fotones, que entrara en el espectrómetro, fig. 1.6 punto (a). El slit es de suma importancia para determinar la resolución óptica del sistema, Normalmente los espectrómetros cuentan con diferentes aperturas de estas ranuras, que van desde los 5  $\mu\text{m}$  hasta los 200  $\mu\text{m}$ , siendo seis las más comunes: 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  o 200  $\mu\text{m}$ , [27].

<1% <https://www.researchgate.net/publication>

<1% <http://2016.imcec.org/callforpaper.asp>

<1% <https://link.springer.com/article/10.100>

<1% <https://github.com/topics/microchip?o=de>

### 1.3.1.2. Espejo colimador.

Se encarga de hacer que los haces que han pasado por la ranura de entrada sean colimados. Utilizando un espejo cóncavo y teniendo el foco del espejo en la ranura de entrada, hace que todos los haces sean reflejados de forma paralela entre ellos, luz colimada, fig. 1.6, espejo (C). Figura 1.6: Diagrama óptico de los haces a la entrada del monocromador y colimados hacia la red de difracción. [6]

Se encarga de descomponer la luz en sus diferentes longitudes de onda, por lo tanto, la red de difracción determina el intervalo de longitudes de onda y en parte la resolución óptica del sistema. Existen dos tipos de redes de difracción dadas por la forma en la que son construidas. 8 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Red de difracción reglada: Es hecha con una herramienta con punta de diamante que realiza cortes en un revestimiento que es una capa reflectante sobre un vidrio.

Red de difracción holográfica: A diferencia de la anterior, tiene como herramienta el uso de una litografía por interferencia. Así, este proceso permite líneas más cercanas, con menos errores. A su vez las redes de difracción pueden ser de transmisión o de reflexión, y de forma cóncava o plana. En la figura 1.7(a) se muestra como la luz reflejada es difractada. Mientras que en 1.7(b) la difracción ocurre cuando la luz pasa a través de una rejilla. La figura 1.7(c) y (d) son ejemplos de redes, (c) red plana y (d) red cóncava.

(a) Red por reflexión (b) Red por transmisión (c) Red de difracción plana (d) Red de difracción cóncava  
Figura 1.7: Redes de difracción, las más comunes son las redes de difracción planas y cóncavas, aunque pueden tener otras formas, como convexa o toroidal [7]. Redes de difracción de reflexión. La luz incidente en la superficie de estas redes es reflejada a diferentes ángulos, los cuales dependen de la longitud de onda. Con lo cual se puede seleccionar un intervalo espectral. Para calcular este ángulo se usa la ecuación 1.3.

Donde  $m$  es el número de orden,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $d$  es la distancia entre líneas contiguas en la red de difracción,  $\alpha$  es el ángulo incidente, y  $\theta$  el ángulo al que es reflejado, véase figura 1.8.  $m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \theta)$  (1.3) 1.4. MONOCROMADOR 9 Figura 1.8: Diagrama de la incidencia y reflexión del haz sobre una red de difracción.  $\alpha$  es el ángulo incidente,  $\theta$  el reflejado,  $d$  es la distancia entre cada línea en la red de difracción,  $\lambda$  la longitud de onda. [8] Redes de difracción de transmisión.

Cuando son de transmisión  $\alpha$  es igual a cero ya que la luz incide perpendicular al plano de la red.

Sustituyendo ese valor en la ecuación 1.3, se simplifica a  $m\lambda = d \sin \theta$  (1.4) 1.3.1.4. Detector. En los espectrómetros actuales frecuentemente el sensor que se utiliza es el CCD, charge-coupled device, con este sensor, cada uno de sus píxeles representa una porción del espectro electromagnético.

Así al incidir la luz reflejada por la red de difracción se obtiene un espectro inmediato el cual puede ser

visualizado en una computadora por medio de un software. 1.4. Monocromador El monocromador es un dispositivo utilizado para separar la luz en sus diferentes componentes a diferencia de los espectrómetros actuales en los cuales se pueden medir u observar un ancho de banda (todo el espectro visible).

En el monocromador, como su nombre lo dice, mono, uno, y chroma color, nos dice que a la salida del monocromador 10 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN solo obtendremos una longitud de onda, de todas las que esta compuestas la luz. El monocromador permite hacer barridos, estos barridos no es otra cosa que modificar el ángulo de incidencia de la luz en la red de difracción. Con lo que se puede ir visualizando a la salida del monocromador, las diferentes longitudes de onda que componen la luz a estudiar.

El monocromador, ver figura 1.9, es similar en configuración a un espectrómetro, la diferencia radica en que después de la rejilla de difracción hay un espejo que se encarga de enfocar las longitudes de onda a una ranura de salida, slit, que al igual que el slit de entrada, puede variar su apertura, la cual influye también en la resolución espectral del sistema. Figura 1.9: Funcionamiento del monocromador. A la salida solo se tiene una longitud de onda. [6] 1.5.

Tubo fotomultiplicador Es un sensor utilizado para poder medir la intensidad luminosa, se le denomina como, PMT, (por sus siglas en inglés, photomultiplier tube). Estos sensores, son de alta sensibilidad, son utilizados para medir luz de baja intensidad, o inclusive el conteo de fotones. Con el monocromador como un sistema para obtener una longitud de onda a la salida y un PMT, como sensor para detectar la intensidad de luminosa a la salida del monocromador, se tienen en principio los elementos para generar espectros. 1.6. Fuentes luminosas. Existen varios tipos de fuentes luminosas, como se ha mencionado.

Estas pueden tener un espectro de luz continua, de línea, o banda. Una fuente luminosa muy importante 1.7. PROPUESTA DE SISTEMA. 11 para este trabajo es la lámpara de mercurio, que posee un espectro de emisión con líneas perfectamente definidas. En la figura 1.10 se observan las líneas de emisión que tiene la lámpara HG-01 de la empresa Ocean Optics [8]. Es útil para calibrar nuestro sistema y con ello, garantizar la relación de intensidad/longitud de onda. Figura 1.10: Espectro de emisión de una lámpara de mercurio a baja presión, la lámpara también emite líneas de argón en longitudes de onda mayores a 600 nm. [8] 1.7.

Propuesta de sistema. Con lo mencionado en este capítulo se entiende que se puede construir un espectrómetro automatizado, con un monocromador, un sensor, un motor a pasos y una tarjeta tanto para controlar y adquirir las señales del sistema; como para visualizar el espectro en una interfaz gráfica. 1.8. Antecedentes. Como ejemplos de automatización de espectrómetros, en el año 2016, Jie Liu, Ze-kun Liu y Zhihong Wang utilizaron un encoder magnético AS5048 para la aplicación en el control de la posición de un motor a DC de un espectrómetro portátil. [28] Más reciente en el año 2017, E. Galli, A. M. Di Giorgio, M. Focardi, E. Pace y G.

Micela desarrollaron un software el cual se encarga del control y procesamiento de información del espectrómetro ARIEL (The Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet 12 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Large-survey. Se implementó un control sobre el AIRS (ARIEL InfraRed Spectrometer). La unidad de control de instrumentos o ICU, por sus siglas en inglés, fue desarrollado con el propósito de que el sistema a bordo fuera suficientemente capaz de implementar las instrucciones funcionales de control y el procesamiento de los datos siendo esto solo la primera parte para este proyecto.

[29] En países en desarrollo se busca utilizar las herramientas con que se cuenta y aprovecharlas al máximo, al tener presupuestos reducidos, muchas veces nos vemos en la necesidad de reutilizar dispositivos antiguos y darles un nuevo uso o una nueva mejora, utilizando tecnología más reciente. Construir un espectrómetro de alta sensibilidad y resolución utilizando un monocromador es la finalidad de este proyecto, y no es la primera vez que se hace este tipo de trabajos, un ejemplo de ello es la automatización de monocromadores modelo MDR-23, realizado en Rusia, los cuales les servirán para realizar estudios de espectroscopia.

[30] Dentro de la línea de investigación se realizan estudios espectroscópicos de las fuentes luminosas desarrolladas y sobre la interacción de la luz con la materia. Debido al alto costo que conlleva comprar un espectrómetro se decide utilizar los equipos y herramientas con que se cuentan para adaptar un monocromador, que nos servirán para realizar mediciones de espectroscopia. Capítulo 2 Marco Teórico. En la introducción se habló de forma breve del funcionamiento de los espectrómetros así como de los monocromadores y cómo tienen similitud en su construcción y funcionamiento.

La principal diferencia es que con el monocromador solo se obtiene la intensidad de la luz a una longitud de onda a la vez, y los espectrómetros modernos miden la intensidad en un amplio intervalo de longitudes de onda. El monocromador permite realizar barridos, modificando el ángulo de incidencia en la red de difracción, a la salida del monocromador se miden las intensidades de la luz a las diferentes longitudes de onda.

Mientras que el espectrómetro obtiene una imagen instantánea del espectro, en el monocromador se va reconstruyendo longitud de onda a longitud de onda el espectro. 2.1. Monocromador. El monocromador, al separar la luz en sus diferentes longitudes de onda se puede utilizar para realizar los barridos en intervalos del espectro electromagnético. El monocromador a utilizar es un SpectraPro-275, de la marca Action Research Corporation.

Existen varios tipos de configuraciones para los monocromadores, las más comunes son: Fastie-Ebert. Ver figura 2.1 (a) consiste en un espejo esférico, y una rejilla de difracción plana. Una sección del espejo se encarga de colimar la luz, y dirigirla a la rejilla, y otra porción se encarga de enfocar la luz difractada hacia el

slit de salida. Es una configuración económica y sencilla, pero tiene ciertos problemas para mantener la calidad de imagen, debido a las aberraciones esféricas y de astigmatismo.

Czerny-Turner. Ver figura 2.1 (b). En este se tienen dos espejos cóncavos, donde el primero se encarga de colimar la luz y el segundo de enfocar la luz difractada, en el slit de salida. La geometría de los espejos en esta configuración es flexible, con esto se puede corregir el efecto de coma, las aberraciones esféricas y de astigmatismo. 13 14 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. (a) Fastie-Ebert (b) Czerny-Turner Figura 2.1:

Diagramas ópticos de dos tipos de monocromadores de red de difracción.

En la configuración (a) solo se tiene un espejo esférico, el cual se encarga de colimar y enfocar la luz, y en la configuración (b) se usan un espejo cóncavo para cada acción. [31] Red de difracción. Es el elemento dispersor del monocromador que se encarga de descomponer la luz en sus diferentes longitudes de onda, dependiendo de las dimensiones de esta así como del periodo de la red o líneas por milímetro. La red, determina el ancho del espectro que pueden trabajar.

El funcionamiento de las redes de difracción se basa en el fenómeno de difracción y de ahí su nombre. El cual ocurre cuando las ondas pasan a través de una pequeña apertura o 2.1. MONOCROMADOR. 15 un obstáculo perturbando así su propagación, ver figura 2.2. En la figura 2.3 se observa un patrón de difracción en una sola rendija. Figura 2.2: Difracción producida por un obstáculo, por un orificio grande y un orificio pequeño el cual está en el orden de la longitud de onda [9] Figura 2.3:

Fenómeno de difracción en una rendija.  $a$  es el tamaño de la rendija. [10] En función de la longitud de onda la luz se refleja a un ángulo dado por la ecuación 2.1 (ver ecuación 1.4). Al incidir diferentes longitudes de onda se obtienen distintos valores de  $\theta$  dependiendo del orden ( $m$ ).  $\sin(\theta) = m \lambda / d$  (2.1) En la figura 2.4 con una longitud de onda menor se observan más ordenes que con una de mayor longitud de onda. El fenómeno que sucede en este proceso es el de interferencia.

El cual consiste en la superposición de dos o más ondas. Se tiene la superposición 16 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. (a) Laser rojo de Helio-Neón  $\lambda = 632.8\text{nm}$  (b) Laser verde de Helio-Neón  $\lambda = 543.4\text{nm}$  Figura 2.4: Dos láseres de Helio-Neón, rojo  $\lambda = 632.8\text{nm}$  y verde  $\lambda = 543.4\text{nm}$ . Son difractados en una red de 50 líneas/mm. El espacio entre cada orden de difracción es mayor en relación a la longitud de onda. [32] constructiva y destructiva, en la primera se fortalecen las ondas y en el otro se contrarrestan.

Esto se puede lograr haciendo coincidir dos o más ondas de la misma fuente en un mismo punto, cuando estas han recorrido diferentes caminos. Al momento de hacer mediciones con los espectrómetros se debe tener cuidado de no confundir los primeros órdenes de las longitudes de onda, con los demás. En la figura 2.5 se ve como coinciden diferentes longitudes de onda en los mismos ángulos. Esto es de suma importancia cuando se analizan los espectros medidos, para evitar una interpretación incorrecta. Figura 2.5:

Luz incidente es difractada y reflejada a diferentes ángulos. Se observa cómo en el mismo ángulo se encuentran dos longitudes de onda diferentes pero de diferente orden. [33] 2.1. MONOCROMADOR. 17 La eficiencia de difracción es un valor que expresa el grado en que se puede obtener energía de la luz difractada con respecto a la luz incidente. La eficiencia de difracción es expresada como absoluta o relativa.

La primera es el porcentaje de radiación monocromática incidente que es difractada en el orden deseado. La eficiencia de difracción relativa se obtiene dividiendo la eficiencia de difracción absoluta por la reflectancia del material de recubrimiento [34]. Las redes de difracción con alta eficiencia son deseables por muchas razones. Siendo más útiles para medir líneas de baja intensidad. [33] Poder de resolución. Es la capacidad de un espectrómetro para poder diferenciar dos líneas espectrales adyacentes de la misma intensidad. Esta dado por la ecuación 2.2.

Donde  $\Delta\lambda$  es la diferencia entre dos longitudes de onda,  $m$  es el orden y  $N$  es la cantidad total de líneas en la red de difracción,  $N = L \cdot W_g$ ,  $L$  es la longitud en milímetros de la red, y  $W_g$  es la densidad de líneas por milímetro.  $R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{m}{N}$  (2.2)  $R = mN$  (2.3) Tomemos como ejemplo una red de difracción de 1200 líneas/mm con una longitud de 110 mm  $R = mN = 1200 \cdot 110 = 132,000$ . De la ecuación 2.2.  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = R$ . En 500,  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.0038$  nm y en 300,  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.0022$  nm.

Como se ve, a menores longitudes de onda este poder de resolución es capaz de distinguir entre longitudes de ondas más cercanas, y de forma inversa entre mayor sea la longitud de onda mayor es la distancia entre estas longitudes de onda que podrá resolver [31]. Red de difracción holográfica. Son recomendadas cuando se quiere trabajar en UV, VIS y NIR. La densidad de líneas debe ser de 1200 líneas/mm o superior. 2.1.1. Motor a pasos. Este tipo de motores se caracterizan por tener un giro de ángulo específico, al ir cambiando la excitación de sus bobinas.

La configuración de los motores a pasos se compone del estator, que es una parte fija, con cavidades, en las cuales se depositan las bobinas 18 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. del motor, la otra parte es el rotor que es la parte móvil del motor, va montado sobre un eje soportado por dos cojinetes lo que le permite girar libremente, ver fig. 2.6. Figura 2.6: Esquema de un motor a pasos. Se observan las dos partes principales que le componen. Rotor a la izquierda y estator a la derecha.

[11] El rotor del motor tiene sus polos N-S, al energizar el estator, este genera sus polos magnéticos N-S, el rotor, buscará el quedar en equilibrio magnético, Norte-Sur y Sur-Norte, lo que provoca que el rotor gire para llegar a este equilibrio. Al cambiar la excitación de las bobinas, los polos N-S creados por el estator, cambiarán, como resultado el rotor volverá a girar, para buscar este punto de equilibrio. De esta forma es como el motor va dando "pasos". En la figura 2.7

para girar en el sentido de las manecillas del reloj, la bobina energizada (B), debe ser apagada, después se energiza la bobina (C), ocasionando el giro del rotor, para dar un giro desde esta posición, se deben ir encendiendo las bobinas en el siguiente orden C, D, A, B, C, des energizando la última bobina energizada. Para girar en sentido opuesto de las manecillas del reloj simplemente se energizan las bobinas en el orden opuesto, C, B, A, D, C. Como se aprecia, el control de un motor a pasos es realmente sencillo, y preciso. Los motores a pasos se pueden clasificar en: Motores de reluctancia variable.

Motores de imán permanente. 2.1. MONOCROMADOR. 19 (a) primer paso del motor. (b) se energiza la bobina C, y el rotor cambia de posición. Figura 2.7: Giro del rotor en sentido horario. [12] Motores Híbridos. Combinan las características de los dos anteriores donde se tiene un rotor de imán permanente. Control de un motor a pasos. El control de motores a pasos se puede realizar de diferentes formas, siguiendo simples secuencias en la alimentación de las bobinas, hay tres formas de mover el motor, paso simple, doble y medio paso. Para el paso simple se energiza solo una bobina a la vez. La secuencia se observa en la tabla 2.1.

Paso doble consiste en alimentar dos bobinas al mismo tiempo de tal forma que el paso se da con más fuerza, tabla 2.2, pues se generan campos magnéticos en dos bobinas y no sola una. Por último el medio paso, el cual combina el paso simple y doble, logrando así que el motor deba dar el doble de pasos para recorrer la misma distancia angular, tabla 2.3. Con estas secuencias y una etapa de potencia se puede controlar los motores a pasos.

Para realizar estas secuencias existen circuitos integrados con 4 pines de entrada y 4 de salida, como el L293D, ver figura 2.8. Este contiene 2 puentes H que tienen como función el ser la etapa de potencia para el motor a pasos, dado que los microcontroladores no tienen la suficiente potencia para hacer girar el motor. Utilizando este circuito integrado se puede hacer dos tipos de conexiones una a 4 hilos y la otra a 2 hilos. A cuatro hilos, fig. 2.9, se pueden utilizar los tres tipos de pasos que se mencionaron antes, teniendo más opciones de control, sin embargo, el ocupar 4 pines de salida de un microcontrolador 20 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. Tabla 2.1: Secuencia para hacer girar un motor a pasos.

[12] Paso simple motor a pasos A B C D PASO 1 1 0 0 0 PASO 2 0 1 0 0 PASO 3 0 0 0 1 PASO 4 0 0 0 1  
Tabla 2.2: Secuencia de paso "doble", se activan dos bobinas a la vez. [12] Paso simple motor a pasos A B C D PASO 1 1 1 0 0 PASO 2 0 1 1 0 PASO 3 0 0 1 1 PASO 4 1 0 0 1 2.1. MONOCROMADOR. 21 Tabla 2.3: Secuencia para medios pasos, se puede avanzar la mitad de un paso. [12] Medio paso A B C D PASO 1 1 0 0 0 PASO 2 1 1 0 0 PASO 3 0 1 0 0 PASO 4 0 1 1 0 PASO 5 0 0 1 0 PASO 6 0 0 1 1 PASO 7 0 0 0 1 PASO 8 1 0 0 1 puede ser un inconveniente si es que se quiere mover más de un motor. A dos hilos, fig. 2.10, solo se puede realizar el paso doble.

El control de los motores a pasos no es complicado, sin embargo, hoy en día se tienen otros tipos de



circuitos integrados que permiten controlar los motores a pasos, de forma más sencilla. Dentro de estos circuitos integrados, drivers, se tienen, el A4988, el DRV8825 y el TB6560, los cuales son muy comunes en las impresoras 3D, pues son de bajo costo y fáciles de cambiar. En este trabajo utilizaremos el TB6560. Driver TB6560. Es un controlador, driver, para motores a paso.

El control de los motores a paso, se facilita con este tipo de drivers, necesitando solo tres pines de control. Este 22 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. Figura 2.8: Esquema del circuito integrado L293, se pueden ver los pines de entrada y salida así como el voltaje de alimentación para el circuito. [35] Figura 2.9: Circuito para controlar el motor a pasos con un microcontrolador. [13] driver, se comercializa ya montado en una tarjeta, esta tarjeta tiene 8 entradas y 4 salidas, así como 9 switches. En la figura 2.11, del lado derecho se tienen tres borneras, cada una compuesta de dos pines, de abajo hacia arriba se tienen, (EN-, EN+), (CW-, CW+) y (CLK-, CLK+).

Donde EN-, CW-, CLK- son GND, de entrada y las otras tres son los pines de control (EN+, CW+, CLK+), siendo controladas con valores en bajo (0V) y alto (5V, 12V y 24V máximo). A continuación, se explica su función. EN. Es el enable, activación del motor, si este tiene un pulso en alto (5V) el motor estará desenergizado o inhabilitado. 2.1. MONOCROMADOR. 23 Figura 2.10: Circuito utilizando solo dos pines de control. [13] CW. Con esta entrada se controla la dirección del motor.

En bajo (0V) el motor girará en sentido horario, y en alto (5V), antihorario. CLK. Se controla la velocidad del motor, cada pulso en alto es un paso del motor. Figura 2.11: Tarjeta TB6560, control para motores a pasos. [14] Del lado izquierdo se tienen otras tres borneras de dos pines cada una. De arriba hacia abajo (+24, GND, A+, A-, B+ y B-). 24 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. +24V y GND son las entradas de voltaje para el motor a pasos, el valor máximo es 24V a 3A.

A+, A-, B+ y B-, son las salidas del driver, conectando en estas los cables del motor a pasos, para así controlarlo. El driver permite limitar la corriente de operación, así como modificar el paso del motor 2.12, logrando 1/16 de paso. Por ejemplo, un motor de 200 pasos por vuelta tiene un avance en grados de 1.8 por paso, si se utiliza la configuración de 1/16 por paso, se tendrá que dar 3200 pasos por vuelta y el avance por paso será de 0.1125° por paso.

Se tienen 9 switches: SW1, SW2, SW3 y S1. Limitan la corriente al motor, en la figura 2.12, en la parte superior se observa la configuración de los switches, para los diferentes valores de corriente. S2. Si la corriente aumenta un 20%, o 50% sobre el valor establecido, dependiendo de si está en alto o bajo, el motor se detendrá. S3 y S4 sirven para variar el paso del motor como se explicó anteriormente. Pasando de paso completo a 1/16 Figura 2.12: Configuración de la tarjeta para corriente de trabajo y máxima, control de paso y decline. [14] 2.2. TUBO FOTOMULTIPLICADOR. 25 Figura 2.13: Esquema de un tubo fotomultiplicador.[36] 2.2. Tubo fotomultiplicador.

Los tubos fotomultiplicadores son detectores utilizados para medir potencia radiante baja, son especialmente sensibles a la radiación ultravioleta y visible, ver figura 2.13. EL funcionamiento de los tubos fotomultiplicadores (PMT), se basa en el efecto fotoeléctrico. La luz pasa a través de la ventana, faceplate, los fotones inciden en el fotocátodo, y este emite electrones, a los cuales se les llega a llamar fotoelectrones, estos viajan por el interior del PMT. Los fotoelectrones son acelerados con campos eléctricos y dirigidos al primer dinodo.

Con lo cual se desprenden más electrones que los que incidieron, este proceso se repite en cada uno de los siguientes dinodos. Cada dinodo está cargado positivamente 100 voltios más que el anterior. Al llegar al nodo receptor. Este proceso da como resultado que las pequeñas corrientes generadas por el fotocátodo sean amplificadas millones de veces. Produciendo de 10<sup>5</sup> a 10<sup>7</sup> electrones por cada fotón incidente.

Los tubos fotomultiplicadores, son muy sensibles, estando limitados a medir fuentes luminosas de baja potencia, de lo contrario se ocasionarían daños irreversibles en la superficie del fotocátodo. La figura 2.13 es un esquemático en el que se aprecia cómo está constituido el PMT. En la figura 2.14 (a) y (b) se muestran dos tubos fotomultiplicadores, la diferencia entre estos radica en donde incidir la luz, en el (a) head-on es en la parte frontal del PMT, y en el (b) side-on es el lateral. En la figura 2.15 se ven módulos de PMT.

Los tubos fotomultiplicadores requieren de una alimentación de alto voltaje partiendo de un voltaje negativo a uno positivo. En cada uno de los dinodos del PMTs, se 26 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. (a) PMT head-on (b) PMT side-on Figura 2.14: Tubos fotomultiplicadores, de la marca Hamamatsu. [15] Figura 2.15: PMTs módulos de la marca Hamamatsu. Están diseñados para diferentes aplicaciones así como para entregar corriente o voltaje a la salida. [15] tienen una diferencia de potencial de 100 volts mayor al anterior.

De este modo el primer dinodo era alimentado con voltajes de 1100 volts hasta llegar al último dinodo el cual tenía ya un voltaje positivo menor a 100 volts. Con los módulos de PMT ya solo se debe energizar con un voltaje de 15 volts. Para este proyecto se va a trabajar con un módulo de tubo fotomultiplicador de la marca Hamamatsu modelo H8249. Módulo H8249-101. La serie H8249 incorpora un PMT-side-on, y un circuito de fuente de alto voltaje y una amplificación de bajo ruido.

El módulo entrega voltaje a la salida, en su interior cuenta con un circuito de transimpedancia con un factor de conversión de 1V / 1 nA. El código -101 es el tipo de módulo. Su respuesta espectral va desde los 185nm hasta los 900nm, cubriendo así desde el Ultravioleta medio, luz visible y un poco del infrarrojo cercano. El módulo cuenta con un ajuste de sensibilidad, figura 2.16. 2.3. MICROCONTROLADOR. 27 Figura 2.16: Ajuste de sensibilidad del PMT módulo H8249 puede ser controlado con una fuente de voltaje

variable o utilizando una resistencia variable.

Con este control se manipula la ganancia que se tendrá en el PMT [37] Figura 2.17: Sensibilidad del tubo fotomultiplicador (izquierda), voltaje de control para la ganancia izquierda. [37] En la figura 2.16 se observa que el módulo se controla con cinco cables, 3 de alimentación, uno de control, y el último un voltaje de referencia, que se puede usar para el control de ganancia, utilizando la configuración de resistencia programable. El voltaje del control de ganancia va desde los 0.2v hasta los 1.2v

y la ganancia desde 103 hasta 107, ver figura 2.17. 2.3. Microcontrolador. Los microcontroladores son dispositivos programables los cuales cuentan con elementos necesarios para funcionar como una minicomputadora en un solo circuito integrado. 28 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. Arduino. Es una tarjeta que se ha popularizado en los últimos años por la facilidad de programación, así como la gran cantidad de librerías y de información en Internet.

Arduino goza de una gran comunidad que día a día crean, mejoran bibliotecas y dan soporte para una gran cantidad de aplicaciones. Muchos sensores son vendidos como módulos para esta tarjeta Arduino, contando con librerías y soportes para su comunicación con softwares como MATLAB o LABVIEW. Programando este microcontrolador, se puede controlar y adquirir datos para el desarrollo del espectrómetro. La tarjeta Arduino Mega está basada en el microcontrolador ATmega2560, el cual cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 15 pueden ser utilizados como salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 UART, tiene una velocidad de 16Mhz, conexión por USB, así como una terminal ICSP.

Para el desarrollo del sistema se requieren de 3 pines digitales para el control del motor a pasos. 2 pines para activar y leer un pulso de un encoder. 3 pines para el control de un potenciómetro digital. 4 pines para la comunicación SPI, para un ADC externo. 2 pines que se usan para la comunicación serial. La tarjeta Arduino Uno, tiene los pines suficientes para este proyecto sin embargo para futuras mejoras esta tarjeta ya no servirá, por ello se decidió utilizar el Arduino Mega. ADC el ADC por sus siglas en inglés, (analog to digital converter), es un convertidor analógico a digital.

Su función es adquirir una señal eléctrica proveniente de un sensor, (voltaje o corriente) y convertirlo a una señal digital, bits. La resolución del ADC está dada en bits, (8, 10, 12, 16, 24 bits), o lo que es lo mismo 2 elevado a estas potencias dando como valores, (256, 1024, 4096, 65 536, 16 777 216). Mientras más posibles valores tenga el ADC menor será la diferencia en valor de un bit a otro bit. Por ejemplo, teniendo un voltaje máximo de entrada de 5V para todos estos ADCs, al leer un valor de 1.2V

se tendrán los valores mostrados en la siguiente tabla 2.4. 2.3. MICROCONTROLADOR. 29 Tabla 2.4: Se muestra la resolución de diferentes ADCs, con un voltaje máximo de entrada de 5 volts. Lectura de un voltaje de 1.2V Resolución (bits) Valor digital voltaje leído (v) Diferencia mínima que puede leer (mV). 8

61.44 1.191 19.53 10 245.76 1.196 4.88 12 983.04 1.199 1.22 16 15728.64 1.2 0.076 24 4026531.81 1.2  
0.0003 ADC-externo.

El ADC del Arduino Mega es de 10 bits, por lo que se busca utilizar un ADC de mayor resolución, usando el MCP3202, ver figura 2.18. Es un ADC de dos canales de 12 bits, con comunicación SPI, el valor máximo que puede leer es de 7 volts. El funcionamiento de los pines se explica en la tabla 2.5 Figura 2.18: ADC MCP3202 dos canales, 12 bits comunicación SPI [16] Tabla 2.5: Tabla con las funciones de los pines del ADC MCP3202 [16] Nombre del PIN Función CS/SHDN Chip select, se activa el ADC CH0 Canal analógico 0 CH1 Canal analógico 1 VSS GND del ADC VDD /VREF Alimentación y voltaje de referencia.

CLK Velocidad de la comunicación DIN Serial Datos de entrada DOUT Serial datos salida Potenciómetro Digital. Como se mencionó el PMT necesita de un control de entrada de voltaje. Utilizando el voltaje de referencia que el propio PMT genera se requiere un 30 CAP TULO 2. MARCO TEÓRICO. potenciómetro digital para poder variar el voltaje de control del tubo fotomultiplicador. El potenciómetro digital es un circuito integrado con el cual uno puede ir variando la resistencia, a través de pulsos digitales, (5v y 0v).

El potenciómetro digital que se uso es el X9C103 [17]. El potenciómetro se observa en la figura 2.19. Tiene 8 pines, su funcionamiento se explica en la tabla 2.6. Figura 2.19: Potenciómetro digital X9C103 [17] Tabla 2.6: Descripción de los pines del potenciómetro digital. [17] PIN Descripción INC Incremento cada cambio de voltaje, alto a bajo, modifica la resistencia en un paso, en la dirección dada por el pin U/D U/D UP/DOWN controla la dirección, (subir o bajar) la resistencia del potenciómetro. VH/RH Son los pines equivalentes a las terminales potenciómetro mecánico.

Vss GND del potenciómetro digital. VW / RW Es la terminal de salida del potenciómetro digital, donde veremos las variaciones de voltaje a la salida. RL/ VL Es la terminal en bajo, del potenciómetro digital. CS el dispositivo es seleccionado cuando su entrada de voltaje está en bajo. Además se puede usar para guardar su posición. Vcc Voltaje positivo de alimentación del potenciómetro El PMT recomienda usar un potenciómetro digital de 10k  $\Omega$ , el X9C103 es de este valor, con 100 pasos para pasar de una resistencia de 0 hasta 10k  $\Omega$ . Esta cantidad de pasos es más que suficiente para el control de voltaje del PMT. 2.4. Interfaz gráfica.

La interfaz gráfica, GUI, en los sistemas es una de las partes más importante, pues es desde donde se manipula el sistema, y se observan los datos adquiridos. Uno de los softwares más populares para hacer GUI, (del inglés Graphical User Interface) es LabVIEW. LabVIEW es un software que ofrece un enfoque de programación gráfico, lo que 2.4. INTERFAZ GRÁFICA. 31 lo hace más intuitivo para realizar algoritmos, analizar datos y diseñar interfaces gráficas de usuario.

Es por estas características, así como la facilidad de comunicación con Arduino, que se decide utilizar

este software. LabVIEW, Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench es un software desarrollado por National Instruments. Fue desarrollado originalmente para el Apple Macintosh en 1986. Su lenguaje gráfico es llamado "lenguaje G". Hoy en día tiene distribución para los sistemas operativos como Windows, Unix, Linux y macOS. Capítulo 3 Desarrollo del sistema.

Para el desarrollo de este sistema espectroscópico se utilizarán los componentes mostrados en la figura 3.1. A continuación, se explica cómo se utilizará cada uno de los componentes que componen al sistema desarrollado. Figura 3.1: Esquema donde se muestran los componentes que se usan para el sistema desarrollado. El ángulo de la red de difracción dentro del monocromador es modificado por un motor a pasos. El Driver TB6560 controla el motor a pasos. Todo a través de un microcontrolador.

La sensibilidad del PMT es cambiada con un potenciómetro digital. 3.1. Control del monocromador El control del monocromador se basa completamente en el control de giro de la red de difracción. Al girar la red se hace un barrido espectral. Este sirve para poder graficar el espectro punto a punto. Desde la parte exterior del monocromador figura 3.2(a) solo se ve el motor a pasos, la apertura, slit, para la entrada de la luz a estudiar, y el slit de salida, donde se obtiene solo una longitud de onda.

El espectrómetro posee la configuración Czerny-Turner, figura 3.2(b), la base que tiene la red de difracción permite colocar tres redes, con lo cual este sistema podrá adaptarse a mediciones en otros intervalos del espectro electromagnético, con solo cambiar a una de estas redes. 3.2.1. CONTROL DEL MONOCROMADOR 3.3 (a) Monocromador SpectraPro 275 (b) Interior del SpectraPro 275 Figura 3.2: Monocromador SpectraPro 275 de la compañía Action Research Corporation. Se observa desde una vista superior su exterior, (izquierda) y su interior (derecha).

La red de difracción se encuentra montada en una estructura a la cual llamaremos base, está diseñada para poder colocar tres redes de difracción, dentro de la programación del monocromador se tiene la opción de elegir entre estas tres redes, en este proyecto solo se utilizará la red de difracción que tiene mayor densidad de líneas por milímetro, siendo 2400 líneas/mm. En la figura 3.3 se aprecia cómo esta estructura está en el interior del monocromador. (a) Base para tres redes de difracción (b) Vista frontal de las redes sobre la base. Figura 3.3:

Base del monocromador SpectraPro 275, diseñada para colocar 3 diferentes redes de difracción. En la figura 3.4 se puede ver una rueda dentada, esta rueda junto con un tornillo sin cabeza CAPTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. En, se puede ver en la figura 3.5, son los encargados de transmitir el giro del motor a la red de difracción. El motor a pasos está conectado al tornillo sin cabeza, al girar el motor a pasos el tornillo sin cabeza se desplaza la misma distancia angular 0.9 por paso.

En la ecuación 3.1,  $n$  es el número de vueltas,  $Z$  es la cantidad de dientes en la rueda y  $e$  es el número de

entradas del tornillo sin ?n.  $n1e1 = n2Z2$  (3.1) Dado que e siempre ser menor que Z, este arreglo funciona como un reductor de veloci- dad. Figura 3.4: Fotografía de la base, se pueden apreciar dos de las redes de difracci?n con las cuales cuenta. En la parte inferior se ve la rueda dentada sobre el cual est? la base. (a) Tornillo sin ?n (b) base con rueda dentada sobre el tornillo sin ?n. Figura 3.5:

Redes de difracci?n sobre la base y a su vez sobre el tornillo sin ?n. 3.2. CONTROL DE LA RED DE DIFRACCI?N. 3.2. Control de la red de difracci?n. El control del motor a pasos se realiza con el driver TB6560. Como se mencion? antes solo se necesitan de tres pines para su control. Los cu?les ser?n los pines 2,3 y 4 del Arduino Mega pin 2 (dire), se encargan? de la direcci?n del motor. pin 3 (paso), se encarga del paso del motor, (velocidad, y cantidad de pasos.)

pin 4 (sleep), activa o desactiva el driver TB6560 El siguiente c?digo hace que el motor a pasos de un solo paso en una direcci?n (sentido horario). Las variables velL y velH, determinan la velocidad del paso. Si se quiere cambiar el giro del motor solo se debe modi?car el valor de dire a LOW. Ejemplo del c?digo para dar un paso. `void pasoMotor() { digitalWrite(sleep, LOW); digitalWrite(dire, HIGH); digitalWrite(paso, HIGH); delayMicroseconds(velH); digitalWrite(paso, LOW); delayMicroseconds(velL); }` El origen o punto cero, estar? determinado por un encoder. El monocromador con- taba ya con uno, para realizar esta misma funci?n.

El encoder o Optical switch, es un inte- rruptor ?ptico. El modelo es el OPB992L51 En la ?gura 3.6, se describe el signi?cado de cada uno de las letras y n?meros de este encoder. La informaci?n proporciona las carac- ter?sticas de su empaquetado y como energizar el encoder. El encoder es el OPB992L51 lo que signi?ca: OPB, OPTeK Asseblly 9, Familia de sensores Photologic 36 CAP?TULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. Figura 3.6:

Informaci?n del encoder, la nomenclatura de este indica su funciona- miento [18] 2 Inverter Totem-Pole ver ?gura 3.7 L Emitter, ?gura 3.8 (a) y (b). 51 tama?o de la apertura 3.8 (c). Para poner en funcionamiento el encoder solo se tiene que energizar el diodo emisor con los cables rojo y negro, el cable negro va al GND del Arduino, al igual que el cable verde. En la ?gura 3.7 se observa el cableado del encoder.

El cable rojo va al Arduino a un PIN de salida, PIN 13, que solo se pone en alto cuando se va a usar el encoder, mientras busca la posici?n cero. El cable azul dar? la respuesta cuando su valor est? en bajo signi?car? que se ha encontrado la posici?n cero, se leer? con el PIN 12 del Arduino. (a) diagrama del encoder. (b) Color de los cables Figura 3.7: Informaci?n del cableado del encoder[18] 3.2. CONTROL DE LA RED DE DIFRACCI?N. 3.7 (a) (b) (c) Dimensi?n de apertura del enco- der Figura 3.8: Dimensiones del encoder. [18] Figura 3.9:

Posici?n cero del sistema, el motor gira hasta que el encoder encuentre la ranura de la posici?n cero. Al iniciar la b?squeda de la posici?n cero, se activa el encoder y se hace girar el motor en una direcci?n de

forma continua. El motor hará girar la red de difracción. Al encontrar la posición cero, véase figura 3.9. el motor avanzará 400 pasos en la dirección opuesta y regresará a buscar la posición cero, para garantizar que realmente se la encuentre.

Con este algoritmo se coloca el motor en su posición inicial. Para activar el motor se usa una interfaz gráfica en la cual se realiza esta acción con botón 1 de la figura 3.10 (1). Al presionar INICIAR, se manda una instrucción al Arduino de girar el motor hasta encontrar la posición inicial, el motor girará mientras en el PIN 12 tenga un valor en ALTO (5V), cuando el valor este en bajo (0V), el motor estará en su posición inicial. 38 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. Figura 3.10: Interfaz gráfica diseñada para inicializar el sistema. 3.3. Calibración. 3.3.1. Lámpara de mercurio.

Lo siguiente es realizar los barridos en el intervalo del espectro electromagnético. A partir de la posición cero el motor se moverá a paso a paso, donde se tendrá el registro de cada paso. El motor hará girar la red de difracción, desde los 0 pasos hasta los 10000 pasos. Con el algoritmo desarrollado se puede determinar cuantos pasos dar, y en qué sentido.

Utilizando el PMT, obtendremos un valor de voltaje, proporcional a la intensidad de luz. Se tendrá una gráfica de pasos vs. voltaje(bits). Para esta medición el motor dará un paso, se tomará un valor del PMT con el ADC del Arduino MEGA, que tiene una resolución de 10 bits. La información del paso y valor será enviado a la interfaz gráfica, para obtener un espectro que se irá formando paso a paso. En la figura 3.11 se aprecia la forma del espectro del led amarillo utilizando nuestro sistema. Al comparar los espectros obtenidos, figura 3.11, por nuestro sistema y el espectro- 3.3. CALIBRACIÓN. 3.9 metro QE65000. Se aprecia un espectro mejor definido en el QE65000.

Para mejorar el espectro medido por nuestro sistema, se realiza la toma de más muestras por paso, y se obtiene un promedio en cada punto. Con un máximo de 99 muestras por paso, ver figura 3.12. (a) Sistema propuesto. (b) QE65000 Figura 3.11: Espectro del LED amarillo medidos con el sistema propuesto (a) y con el QE65000 (b). Figura 3.12: Captura del espectro de un LED amarillo, tomando 99 muestras por punto.

La cantidad de muestras que se toma por punto es de suma importancia para obtener un espectro más limpio y sin tantas variaciones punto a punto. Para la calibración del sistema utilizaremos 99 muestras por paso para poder medir el espectro de la lámpara de mercurio. Esto con el fin de adquirir un espectro lo más limpio posible y poder obtener 40 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. la relación paso a longitud de onda. Las líneas de emisión de la lámpara de mercurio a buscar son 12. En la figura 3.13 se enlistan. Figura 3.13: Líneas de emisión de la lámpara de Mercurio.

Lámpara de Ocean Optics HG-1 Mercury Argón. [8] En la figura 3.14, se pueden apreciar 11 líneas de forma fácil más una de ellas es un segundo orden de la primera longitud de onda de mayor intensidad de la



Lámpara de mercurio (  $\lambda = 253.7$  nm línea (1), su segundo orden  $\lambda = 507.5$  nm (8)). Esto se demuestra más adelante utilizando un filtro pasa alto mayor a 400nm. Entre las líneas 2 y 4 se alcanza a visualizar una tercera línea, figura 3.14. Entre las líneas 1 y 2 se observa otra pequeña línea (x) de la lámpara.

Primero identifiquemos las líneas de emisión principales de la lámpara de mercurio en nuestro espectro. Estas líneas facilitan la obtención de la relación paso longitud de onda. (a) Espectro de la lámpara de mercurio HG-01 de Ocean Optics (b) Acercamiento a las líneas de emisión. Figura 3.14: Espectro medido con el sistema desarrollado, intensidad contra pasos del motor. 3.3. CALIBRACIÓN. 41 Figura 3.15: Espectro de emisión del mercurio, se aprecian más de 12 líneas de emisión. Se resaltan las 12 líneas que usaremos para calibrar el sistema desarrollado, [3].

La lámpara de mercurio tiene en realidad más de 12 líneas de emisión, véase figura 3.15. Para poder observarlas se requieren de sistemas de alta resolución y sensibilidad [3]. Para calibrar el sistema se utilizaron 12 líneas de emisión, ver figura 3.13. 3.3.2. Relación pasos a longitud de onda. Se identificaron los máximos de cada pico dentro de la medición del espectro adquirido por el sistema. Con los datos obtenidos se graficó el espectro utilizando MATLAB, ver figura 3.16(a).

Al hacer un acercamiento al espectro de las líneas de emisión, se logran visualizar más líneas, véase figura 3.16(b). (a) Pondremos atención a ese recuadro. (b) Se observan más líneas de emisión Figura 3.16: Líneas de emisión del mercurio. Obtenidas por el sistema, su relación es en pasos y no en longitud de onda.) Se realizaron 10 mediciones del espectro de la lámpara de mercurio. En cada una se regresó al punto inicial, posición cero. 42 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. En la figura 3.17(a) se grafica un solo espectro. Al graficar 10 mediciones del mismo espectro para ver la repetitividad del sistema, véase figura 3.17(b) se aprecia que hay pocas variaciones entre cada medición. En la figura 3.17(c), se ve solo uno de los picos de emisión.

Cada medición del espectro entrega las mismas líneas de emisión. (a) Espectro de la lámpara de mercurio medido. (b) Gráfica con 10 mediciones del espectro de la lámpara de mercurio. (c) Se observa la repetitividad a la hora de medir del sistema, nos enfocamos en solo un pico. Figura 3.17: Espectro de la lámpara de mercurio. se grafican varias mediciones de este espectro para poder observar la repetitividad del sistema a la hora de obtener espectros.

Se usan estas mediciones del espectro de la lámpara de mercurio para encontrar las 12 líneas de emisión usadas para calibrar el sistema. Trabajando con los valores de estos espectros y utilizando la función `findpeaks` de MATLAB, se encuentran una gran cantidad de picos, ver tabla 3.1. Tabla 3.1: Picos encontrados con `findpeak` en las mediciones

espectro	1 picos	espectro	2 picos	espectro	3 picos	espectro	4 picos
espectro 5	294	299	315	294	353	picos	espectro 6
espectro 7	picos	espectro 8	picos	espectro 9	picos	espectro 10	353
279	279	347	334	Para	identificar	las 12 líneas de interés se hace un suavizado al	

espectro, con la función `smooth` en MATLAB. Con el suavizado se eliminan variaciones pequeñas que 3.3. CALIBRACIÓN. 43 se tienen en la medición.

Además, al colocar la condición de solo encontrar picos con una intensidad igual o mayor a las 12 líneas de emisión que se buscan. Utilizando la función `[picos1, pasos1]=findpeaks(s1, MinPeakHeight, 20)`. El número de picos encontrados es 14 en cada medición. La función proporciona la intensidad del pico (`picos1`), y la posición, (`pasos1`) donde se encuentra cada pico. En la figura 3.18, podemos observar estos 14 picos. Figura 3.18: Espectro de emisión de la lámpara de mercurio donde solo se grafica la posición y la intensidad de los 14 picos encontrados.

Con esta información se intenta encontrar cuánto varía un espectro del otro. En la figura 3.19 se puede apreciar la diferencia más grande en el paso, en el que se encuentra el pico es de 5 y de 3 la menor. Figura 3.19: De los 14 picos encontrados se muestra la diferencia entre el paso en el que se encuentra cada pico. El máximo es de 5 pasos de diferencia y siendo 3 pasos lo normal. La repetitividad del sistema es buena. Utilizando el promedio de las mediciones hechas se obtiene la relación paso longitud de onda.

Al comparar el espectro medido con el sistema y el que se tiene en la literatura, se visualizan líneas de emisión figura 3.20. 44 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. Para corroborar que varias de las líneas de emisión son de segundo orden se utilizó un filtro pasa alto mayor de 415nm. En la figura 3.21 se aprecia como hay líneas de emisión que desaparecen al colocar el filtro. Con esta información se identifican las 12 líneas de emisión para la calibración. (a) Espectro del Hg 12 líneas (no todas se ven en la grafica). (b) Espectro del Hg medido 14 líneas Figura 3.20: Diferencia visible en la medición del espectro de la lámpara de mercurio. Hay dos líneas que no coinciden se decide cuáles quitar. Figura 3.21: Espectro de la lámpara de mercurio con y sin filtro, intensidad contra número de pasos. Se aprecia como la mayoría de las líneas desaparecen.

Se prevén estas son menores a 415nm, y de las líneas de mayor longitud de onda solo desaparecen dos.

3.3.2.1. Curve Fitting Tool. El `curve fitting` es un proceso para construir una función matemática, que se adapte a una serie de datos. Con este ajuste se tiene una interpolación. Lo que permite tener una relación paso a longitud de onda. Para obtener esta función se deben ingresar dos vectores 3.3. CALIBRACIÓN. 45 a la herramienta. En la tabla 3.2 se observan los datos que se utilizaron. El vector Pasos contiene los valores de los pasos en el que se encuentra cada pico.

El vector Lambda son los valores de las líneas de emisión en nanómetros. La herramienta nos muestra los valores de "R-square" y "RMSE" para elegir la función con el mejor ajuste. La figura 3.22 es una captura de pantalla de la herramienta de MATLAB, `curve fitting tool`. Tabla 3.2: Las 12 líneas de emisión de la lámpara de mercurio, en nanómetros y el número de pasos que se encontraron para cada una de estas líneas.

Longitud de onda Pasos Longitud de onda Pasos Longitud de onda Pasos 253.652 2803 334.148 4011 435.833 5625 296.728 3442 365.015 4488 546.074 7558 302.150 3523 404.656 5116 576.96 8149 313.155 3690 407.783 5164 579.066 8190

Figura 3.22: Interfaz de curve fitting tool de MATLAB. El coeficiente de determinación o también llamado  $R^2$  o R-square, en inglés. Es un valor que oscila entre 0 y 1. Entre más cerca este a 1 mayor será el ajuste del modelo a la variable que se está buscando.

En general este valor es el más importante a la hora de buscar el mejor ajuste. EL RMSE, root-mean-square error por sus siglas en inglés, es la raíz del error cuadrático medio, es una medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores predichos por un modelo. Es una medida de precisión, para comparar errores de predicción de diferentes modelos. Su valor es siempre positivo y entre más cercano sea a cero menos es el error del ajuste. En la tabla 3.3

se ve que varios ajustes tienen una  $R^2$  igual a 1 pero con diferentes RMSE. El ajuste por Fourier con un solo término es el que tiene un RMSE = 0.1112. Tabla 3.3: Diferentes ajustes obtenidos con curve fitting tool. Varios de estos ajustes tienen una R-square = 1. Por lo que se utiliza el siguiente criterio el RMSE. Siendo Fourier el mejor ajuste. Tipos de ajuste Número de términos  $R^2$  Adj  $R^2$  RMSE SSE Exponencial 1 0.9828 0.9811 15.5674 2423.4 2 1 0.3485 0.9716 Fourier 1 1 0.1112 0.0990 2 1 0.1283 0.0988 Gaussian 3 1 0.1214 0.0442 Polynomial 3 1 0.1112 0.0989

Suma de senos 1 1 0.3360 1.0161 3 1 0.1041 0.0325

La suma de senos con tres términos tiene mejores resultados, pero al intentar resolver la ecuación para obtener la relación opuesta, de longitud de onda a paso se encontraron problemas. Por lo anterior se trabajó con el ajuste de Fourier usando la ecuación 3.2.  $f(x) = a_0 + a_1 \cos(x/w) + b_1 \sin(x/w)$  (3.2)

Donde:  $x$  = pasos  $a_0 = -23.77$   $a_1 = 76.47$   $b_1 = 848.2$   $w = 8.441 \times 10^{-5}$

La ecuación quedará como: 3.3. CALIBRACIÓN.  $f(x) = -23.77 + 76.47 \cos(\text{pasos} \times 8.441 \times 10^{-5}) + 848.2 \sin(\text{pasos} \times 8.441 \times 10^{-5})$  (3.3)

En la tabla 3.4 se compara el espectro de emisión de la lámpara de mercurio contra la ecuación del ajuste. El error absoluto más grande es de 0.269 nm. En la figura 3.23, se aprecia el espectro de la lámpara de mercurio medido con el sistema. Donde la relación ya es intensidad contra longitud de onda. Los asteriscos azules representan donde deben aparecer las líneas de emisión.

En rojo se aprecia el espectro medido. Tabla 3.4: Comparación de la longitud de las líneas de emisión de la lámpara de mercurio y la ecuación obtenida para encontrar la relación de pasos a longitud de onda (nm). Lámpara de Hg Ajuste de paso a Diferencia Lámpara de Hg Ajuste de paso a Diferencia 253.652 253.7412 0.0892 404.656 404.6091 0.0469 296.728 296.7452 0.0172 407.783 407.7118 0.0712 302.15 302.1988 0.0488 435.833 435.7680 0.065 313.155 312.9268 0.227 546.074 546.0847 0.0107 334.148 333.879 0.269 576.960 576.9355 0.0245 365.015 365.1355 0.1205 579.066 579.0719 0.0059

Figura 3.23: El espectro de emisión de la lámpara de mercurio, adquirido por nuestro sistema y ajustado con la ecuación, color rojo.

El asterisco azul son las 12 líneas del espectro de emisión del mercurio. Se aprecia como coinciden estas 12 líneas con el espectro obtenido con el sistema. 48 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. Este ajuste se introduce en la interfaz gráfica. De esta forma mientras se obtienen los datos, se visualiza el espectro medido, expresado en intensidad relativa contra longitud de onda. La figura 3.24 es un ejemplo de medición con el sistema. Figura 3.24: Espectro de la lámpara de mercurio medido con el sistema.

La intensidad está en unidades relativas y la longitud de onda en nanómetros. El sistema ya está calibrado. 3.3.3. ADC MCP3202. En la figura 3.25, se ve a la izquierda el espectro medido con el ADC del Arduino MEGA y a la derecha el ADC externo. (a) ADC propio del Arduino MEGA 10bits (b) ADC- MCP3202 de 12 bits Figura 3.25: Comparación entre el ADC del Arduino MEGA, izquierda y el ADC MCP3202, derecha. Las dos gráficas están normalizadas. El ADC MCP3202, es un ADC de 12 bits de resolución, el cual cuenta con comunicación serial SPI.

Como se ha mencionado Arduino tiene una amplia comunidad, la 3.3. CALIBRACIÓN. 49 cual día a día comparte trabajos y mejoras. Dentro de estos ya existen bibliotecas diseñadas para este ADC en específico. Una de ellas fue desarrollada por Souvik Saha [38], su trabajo está en un repositorio de GitHub, [39] para que cualquier persona pueda usarlo así como en una página web dedicada a compartir bibliotecas, [40]. Esta biblioteca fue ingresada en nuestro algoritmo. 3.3.4. Potenciómetro digital.

La sensibilidad del PMT puede ser ajustada variando un voltaje de entrada en el módulo del PMT. Este ajuste se puede realizar de dos formas. Utilizando un potenciómetro o una fuente de voltaje variable ver figura 3.26. Para este control se utiliza un potenciómetro digital. Así manipulamos el voltaje de control desde la interfaz gráfica. Figura 3.26: Esquema que muestra cómo modificar la sensibilidad del PMT. Esta variable al cambiar el voltaje de control. Se puede realizar con una fuente variable o utilizando un potenciómetro y usando el voltaje de referencia del PMT.

[19] Se tomaron 10 valores de voltaje en cada paso del potenciómetro para ver cómo se comportaba y las variaciones de voltaje, ver figura 3.27(a). La figura 3.27(b) es la gráfica de la desviación estándar. Al hacer un acercamiento, véase figura 3.27(c), se aprecia que la desviación estándar es muy pequeña. En la figura 3.27(d) se observa el valor de las desviaciones estándar en cada paso. Siendo de 10mV el valor más grande de la desviación que es equivalente a un paso del potenciómetro digital.

Al aumentar la sensibilidad del PMT se visualizan más líneas de emisión, y con mayor intensidad. Al realizar la medición con 0.2V, ya se aprecia el espectro de la lámpara de mercurio, ver figura 3.28(a). Al incrementar el voltaje que controla la sensibilidad del 50 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. (a) Voltaje en cada paso del potenciómetro digital. (b) Gráfica de la desviación estándar. (c) desviación estándar de cerca. La variación de voltaje es de aproximadamente un paso, 10mV. (d) Valor de la

desviación estándar en cada paso. Figura 3.27: Comportamiento del potenciómetro digital X9C103.

Utilizando el voltaje de referencia del módulo de PMT. Se aprecia que la desviación estándar es muy pequeña.

Así como las variaciones de voltaje, por lo que el sistema podrá medir de forma correcta. PMT a 0.5V. Se aprecia como en dos líneas de emisión,  $\lambda=253.6\text{nm}$  y en su segundo orden  $\lambda=507.2\text{nm}$ , el sistema se satura, véase figura 3.28(b). (a) Ganancia a 0.20 volts (b) Ganancia a 0.50 volts Figura 3.28: Espectro de lámpara de mercurio medido con diferentes sensibilidades del PMT. Al ir incrementando la sensibilidad del PMT, aumenta la intensidad captada en cada línea de emisión. Con lo que logramos observar más líneas. 3.4.

INTERVALO ESPECTRAL DE TRABAJO DEL SISTEMA. 51 3.4. Intervalo espectral de trabajo del sistema. El PMT tiene un intervalo de sensibilidad que va desde los 180 nm hasta los 900 nm. Como se ve en la figura 3.29(a), su pico de sensibilidad está en los 400 nm, y a partir de aquí esta decae, al llegar a los 900 nm ya es mínima. Mientras que la red de difracción va desde los 200nm hasta los 850nm véase figura 3.29(b).

Su máximo pico de eficiencia se encuentra en los 500nm aproximadamente, de aquí baja. (a) Respuesta espectral del PMT, su pico de sensibilidad está en los 400nm (b) Eficiencia de la red de difracción con 2400 líneas/mm Figura 3.29: Respuesta espectral de la red de difracción y del PMT, se aprecia que ambos empiezan en los 200nm, y llegan hasta los 800nm pero con sensibilidad mucho menos (PMT) [19] y menor eficiencia (red de difracción. [20]) Estos dos componentes serán los que limitarán el intervalo en el que nuestro sistema puede medir espectros.

Se revisa el intervalo en el que puede trabajar el sistema, utilizando una lámpara de Tungsteno-Halógeno, de OceanOptics, esta lámpara tiene una respuesta espectral desde los 300 hasta los 1050 nm [21], figura 3.30. Esta lámpara se requiere para observar la sensibilidad del sistema a longitudes mayores a 600nm. Al medir la lámpara LS-1-CAL, con el sistema desarrollado se tiene una gráfica con un valor máximo en la longitud de onda de 544.1nm, ver figura 3.31. Después de  $\lambda=544.1\text{nm}$  la intensidad en el espectro decae hasta los 780nm.

Esto se debe tanto al tubo fotomultiplicador como a la red de difracción como se explicó anteriormente. 52 CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SISTEMA. Figura 3.30: Espectro de la lámpara LS-1-CAL de OceanOptics. Usada para calibrar los espectrómetros en potencia. Su intervalo va desde los 300 nm hasta longitudes de onda mayores a los 1000nm. [21] Figura 3.31: Lámpara de tungsteno-halógeno de OceanOptics, LS-1-CAL. Medida con el sistema desarrollado. Se observa que el sistema comienza a decaer en sensibilidad a partir de los 540nm aproximadamente.

Al llegar a los 780nm el sistema es incapaz de medir. Capítulo 4 Mediciones con el sistema Se realizaron

mediciones con los diferentes espectrómetros para compararlos con nuestro sistema. El espectro de la lámpara de mercurio fue medido con el espectrómetro HR4000 con dos tiempos de integración diferentes. Se observa la medición con 8ms de tiempo de integración en la figura 4.1(a) y con 100ms de integración 4.1(b).

Se aprecia como el sistema se satura en varias de las líneas de emisión. (a) HR4000, tiempo de integración 8ms (b) HR4000, tiempo de integración 100ms Figura 4.1: Espectro de la lámpara de mercurio medido con el espectrómetro HR4000. Se utilizan dos tiempos de integración diferentes. Se tiene el espectro de la lámpara de mercurio medido con el espectrómetro QE65000, el cual a los 8ms de tiempo de integración (el cual es el valor mínimo que acepta), se visualiza como se satura en ciertas longitudes de onda, ver figura 4.2. 53 54 CAPÍTULO 4.

MEDICIONES CON EL SISTEMA (a) Espectro de la lámpara de mercurio con un tiempo de integración de 8ms, mínimo del sistema. (b) Espectro de la lámpara de mercurio con un tiempo de integración de 100 ms. Figura 4.2: Espectro de la lámpara de mercurio adquirido con el espectrómetro QE65000. Se aprecia como se satura en una gran cantidad de líneas. Con el sistema propuesto todas las mediciones se hacen con los slits de entrada y de salida en 10  $\mu\text{m}$ , para tener la mayor resolución. En la figura 4.3,

se está usando el máximo de sensibilidad en el PMT. Figura 4.3: Espectro de la lámpara de mercurio medido con el sistema desarrollado. El monocromador tiene los slits de entrada y salida en su menor apertura, 10  $\mu\text{m}$ , y en el máximo de sensibilidad del PMT. 55 Dentro de las 12 líneas de emisión del espectro de mercurio, que se usaron para calibrar. Hay dos que se encuentran relativamente cerca. Las líneas tienen la longitud de onda de 576.96 nm y 579.066 nm. En la figura 4.4(a) se observa como el QE65000 apenas logra distinguir las dos líneas, el HR4000, figura 4.4(b) las resuelve sin problemas.

Mientras que el sistema desarrollado logra resolver con mayor facilidad estas mismas líneas, véase figura 4.4(c). (a) Líneas de emisión medidas con el QE65000, tiempo de integración 8ms. (b) Líneas de emisión medidas con el HR4000, tiempo de integración 3.8ms (c) Líneas de emisión medidas con el sistema desarrollado. Slits de entrada y salida a 10  $\mu\text{m}$ , sensibilidad 0.8v. Figura 4.4: Dos de las líneas de emisión de la lámpara de mercurio  $\lambda = 576.96\text{nm}$  y  $579.066\text{nm}$ . Se aprecia que el sistema desarrollado resuelve mejor estas dos líneas de emisión.

En la figura 4.5 se visualizan el espectro de la lámpara de tungsteno-halógeno medido con los espectrómetros QE65000, HR4000 y el sistema desarrollado. Como se puede apreciar los espectros con que se cuentan tienen un intervalo de medición mayor al del sistema desarrollado. El sistema desarrollado puede medir hasta los 780nm, donde el valor máximo de lectura está en los 544.6 nm. A partir de los 600nm comienza a decaer de forma rápida su sensibilidad.

Añ y cuando el intervalo que el sistema puede medir es menor tiene mejor resolución que los espectrómetros, HR4000 y QE65000 como se ve en 56 CAPÍTULO 4. MEDICIONES CON EL SISTEMA la figura 4.4. Figura 4.5: Lámpara LS-1-CAL, medida con los espectrómetros, HR4000 (verde) y QE65000 (azul), y el sistema desarrollado (rojo). Se observa que el sistema tiene un intervalo menor que el de los dos espectrómetros. Se midieron diferentes fuentes luminosas. Donde se encuentran pequeñas diferencias entre los espectrómetros. En la figura 4.6

se visualiza el espectro de un LED ultra- violeta, y una diferencia de 2nm entre nuestro sistema y el QE65000. La figura 4.7 es el espectro de un LED violeta, 400nm, hay una gran similitud entre las tres mediciones(a). Con una diferencia de máximo 0.8nm entre los picos máximos (b). Un LED rojo  $\lambda = 650\text{nm}$ , se obtienen resultados similares al LED violeta  $\lambda = 400\text{nm}$ , véase figura 4.8(a), donde la diferencia mayor es de 0.6nm ver figura 4.8(b). En el LED rojo de 700nm encontramos ya una diferencia notoria de casi 20nm, ver figura 4.9, entre el sistema y los dos espectrómetros, Figura 4.6:

Espectro del LED Ultravioleta 380nm. Medido con los dos espectrómetros, (HR4000 y QE65000) y el sistema desarrollado. La gráfica se encuentra normalizada. 57 (a) Espectro del LED violeta, 400nm (b) Acercamiento a los máximos. Figura 4.7: LED violeta  $\lambda = 400\text{nm}$ , medido con los espectrómetros HR4000 (verde), QE65000(azul) y el sistema (rojo). Los tres instrumentos obtienen el mismo espectro(a). Las diferencias son tan pequeñas que solo se notan al acercarnos al espectro (b). (a) LED rojo  $\lambda = 650\text{nm}$  (b) Acercamiento a los máximos Figura 4.8:

LED rojo  $\lambda = 650\text{nm}$  medido con los tres sistemas, al igual que con el LED UV  $\lambda = 400\text{nm}$ , se obtiene espectros muy similares (a). Acercándose se observan las pequeñas diferencias que hay en el pico de cada medición (b). (a) Espectro del LED rojo  $\lambda = 700\text{nm}$  Figura 4.9: LED rojo ( $\lambda = 700\text{nm}$ ) medido con los tres sistemas. En este espectro es donde se observa una diferencia de casi 20nm entre el espectro medido con el sistema y los dos espectrómetros (HR4000 y QE65000).

58 CAPÍTULO 4. MEDICIONES CON EL SISTEMA Al graficar el espectro del LED rojo ( $\lambda = 700\text{nm}$ ) sobre la respuesta de los sistemas ante la lámpara LS-1-CAL, vemos que el LED rojo está en una zona donde el sistema tiene una menor respuesta y que esta disminuye cada que avanza, figura 4.10. El error no se debe al ajuste que se realizó con curve fitting tool. En la gráfica que se observa en la figura 4.11

podemos apreciar como al ir avanzando en la longitud de onda el paso es cada vez menor. Sin embargo, vemos que de los 650nm a los 700nm no hay una pérdida que muestre que el pico del LED rojo en 700nm aparezca 20nm antes. Por ello concluimos que es por la sensibilidad del PMT y la eficiencia de la red, que el pico aparezca antes de lo esperado. Figura 4.10: Espectro de la lámpara LS-1-CAL y el LED rojo  $\lambda = 700\text{nm}$ . Figura 4.11: Longitud de onda que se avanza por paso.



Conclusiones Utilizando un monocromador SpectraPro 275 de la marca Action Research Corporation que se tena en el laboratorio, un tubo foto multiplicador Hamamatsu, modelo H8249-101 y con un sistema desarrollado para el control de movimiento de un motor a pasos, se construy un sistema espectromtrico automatizado y el mismo fue debidamente caracterizado. El sistema es capaz de realizar mediciones dentro de un intervalo de los 250nm hasta los 650 nm, con un paso de 0.067nm que disminuye a 0.042nm. En este intervalo tiene un mejor poder de resolucin que el de los espectrometros HR4000 y QE65000 de la empresa Ocean Optics.

59 Trabajo futuro. La lmpara de tungsteno-halogeno, LS-1-CAL, puede ser utilizada para hacer una calibracin de la respuesta del sistema desarrollado. Esto garantizar que el sistema pueda medir a longitudes mayores a 650nm con mejor exactitud. Utilizar un ADC de mayor resolucin mejorar a la obtencin de los espectros. Permitiendo medir variaciones de intensidad mms pequeos. Se pueden utilizar las otras redes de difraccin con sensores que tengan un intervalo de operacin en longitud de onda mayor.

Sin embargo, estas redes de difraccin nos daran menor resolucin. 60 61 Bibliografa [1] F. Horst and Jailbird., Electromagnetic spectrum.svg. 2012. [2] Fsic Ch, Efecto doppler y espectros. 2019. [3] T. J. Bruno, W. M. Haynes, and D. Lide, CRC handbook of chemistry and physics, 2016. [4] A. A. Hashim, M. Majid, and B. Mustafa, Legibility of Web Page on Full High Definition Display, in Proceedings - 2013 International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies, ACSAT 2013, pp. 521-524, 2013. [5] D. Karpenko and V. Ganapetyan, Light in the Reef Aquaria. [6] I.

StellarNet, What is a Czerny-Turner Configuration? - StellarNet, Inc.. [7] I. Thorlabs, Diffraction Gratings Tutorial. [8] Ocean Optics, HG-1 Mercury Argon Calibration Source, 2000. [9] Douglas C. Giancoli, Physics principles with application, vol. 53. Pearson Education, Inc., 2005. [10] busybeta Lorencor, DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA LONGITUD DE ONDA DEL ESPECTRO VISIBLE A PARTIR DEL PATRON DE DIFRACCION DE UNA RENDIJA. [11] P. Acarnley, Stepping Motors: a guide to theory and practice. IET, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 4th ed., 2002. [12] Y.

Padmaraja, S. Cattopadhyay, and Microchip Technology Inc., Stepper Motor Microstepping with PIC18C452, MICROCHIP, pp. 1-58, 2002. [13] Diymakers, Mover motores paso a paso con Arduino DiYMakers. [14] Texas Instruments, Tb6560 stepping motor driver, Texas Instruments Incorporated, p. 1, 2014. 62 BIBLIOGRAFIA 63 [15] Hamamatsu, Photomultiplier Tubes. Hamamatsu Photonics K.K., 2007. [16] Microchip Technology Inc, MCP3202 12-bit A/D Converter, 2006. [17] RENESAS, X9c102, x9c103, x9c104, x9c503. 2019. [18] I.

TT Electronics, Photologic Slotted Optical Switch OPB990 Series, 2016. [19] HAMAMATSU,

◆Photosensor Modules H8249,◆ 2008. [20] Edmund Optics Inc., ◆2400 Grooves/mm, 12.7mm Square, UV Holographic Gra- ting,◆ 2020. [21] Manual, ◆LS-1-CAL Series Calibration Light Sources Manual,◆ Ocean Optics, pp. 1◆8, 1000. [22] T. J. Bruno and P. D. Svoronos, CRC handbook of fundamental spectroscopic corre- lation charts. CRC Press, 2006. [23] Space Enviroment Technologies, ◆ISO 21348 De?nitions of Solar Irradiance Spec- tral Categories,◆ Space Enviroment Technologies, no. section 5, pp. 6◆7, 2007.

[24] CIE(1926), ◆Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings, 1924.,◆ 1926. [25] B&W Tek, ◆Spectrometer Knowledge,◆ 2016. [26] BWTEK, ◆Part 1: The Slit - B&W Tek.◆ [27] Ocean Optics, ◆QE65000 Data Sheet,◆ Ocean Optics, 2016. [28] Jie Liu, Zekun Liu, Zhihong Wang, and Junyi Cao, ◆AS5048 magnetic encoder for the application in DC motor position control of portable spectrometer,◆ in 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automa- tion Control Conference (IMCEC), pp. 345◆348, IEEE, oct 2016. [29] G. M. E. Galli, A.

M. Di Giorgio, M. Focardi, E. Pace, ◆Ariel Spectrometer Ins- trument Control and Data Processing Software,◆ European Planetary Science Con- gress, vol. 11, pp. 11◆13, 2017. 64 BIBLIOGRAF◆A [30] S. P. Kraminin, E. M. Zobov, and M. E. Zobov, ◆Automation of a Spectral System Based on an MDR-23 Monochromator,◆ Journal of Applied Spectroscopy, vol. 82, pp. 307◆310, may 2015. [31] D. Gratings, T. Optics, and S. Page, ◆Section 1 : Diffraction Gratings Ruled & Ho- lographic,◆ Horihaba, pp. 1◆8, 2008.

[32] GIPhotoStock/Science Source, ◆Science Source - Diffraction on a Slit.◆ [33] C. Palmer, ◆Diffraction Grating Handbook,◆ Journal of the Optical Society of Ame- rica, vol. 46, no. 1, pp. 20◆23, 2005. [34] Shimadzu, ◆08.Diffraction Ef?ciency & Relationship between Diffraction Ef?- ciency and Polarization : SHIMADZU CORPORATION.◆ [35] L. L293, ◆L293D Quadrupel Half-H Drivers,◆ Texas Instruments Incorporated, 1986. [36] Hamamatsu Photonics K.K., Photomultiplier Tubes: Basics and Applications.

Ha- mamatsu Photonics K.K. Electron Tube Division, third edit ed., 2006. [37] Hamamatsu, ◆Photosensor Modules,◆ Photosensor Modules, HAMAMATSU, p. 2, 2008. [38] ◆(2) Souvik Saha | LinkedIn.◆ [39] S. Souvik, ◆souviksaha97/MCP3202: Contains the library I created to interface the MCP3202 12 bit ADC I required for my ?nal year thesis.,◆ 2019. [40] ◆Souvik Saha - Arduino Libraries,◆ 2020.