



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESPECTROFOTÓMETRO
ULTRAVIOLETA-VISIBLE PARA USO DIDÁCTICO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ELECTRICA-ELECTRÓNICA

P R E S E N T A:

JUAN RICARDO DAMIÁN ZAMACONA



TUTOR:
M. I. MIGUEL ÁNGEL BAÑUELOS SAUCEDO

2006

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en I. L. Arturo Haro Ruiz

Secretario: M. en I. Lauro Santiago Cruz

Vocal: M. en I. Miguel A. Bañuelos Saucedo

1^{er}. Suplente: M. en I. José Castillo Hernández

2^{do}. Suplente: M en I. Sergio Quintana Thierry

Lugar donde se realizó la tesis:

CCECADET

México, D.F.

*A: Renata, Andrea y Adriana
quienes con su amor y cariño, me
inspiran a seguir adelante.*

*A mis padres: Ignacio y Ma. del
Carmen, ya que con sus nobleza y
valor, han sido un ejemplo a
seguir.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo y la asesoría brindada para el desarrollo de este trabajo de tesis a mi tutor, M. en I. Miguel Ángel Bañuelos Saucedo; a los miembros del jurado: M en I. L. Arturo Haro Ruiz, M. en .I Lauro Santiago Cruz, M. en I. Sergio Quintana Thierry y M. en I. José Castillo Hernández por su tiempo brindado en la revisión de este trabajo; a todos mis compañeros del laboratorio de electrónica por su apoyo y valiosos comentarios. También agradezco al CONACyT, a la Facultad de Ingeniería, al CCADET y a la UNAM por su apoyo y haberme brindado un espacio para mi superación personal.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN -----	4
Capítulo 1	
PRINCIPIO DE OPERACIÓN	
1.1.- Espectroscopía-----	7
1.2.- Clasificación de los espectrofotómetros-----	7
1.3.- Dualidad de la luz-----	10
1.4.- Interacción de la luz con la materia-----	11
1.5.- Ley de Beer-Bougner-----	12
1.6.- Instrumento para medir la absorción de Luz-----	15
Capítulo 2	
FUENTES DE ALIMENTACIÓN PARA LAS LÁMPARAS	
2.1.-Fuente de radiación visible-----	17
2.2.-Ciclo de regeneración del halógeno-----	18
2.3.-Espectro de emisión de una lámpara de halógeno-----	19
2.4.-Fuente de radiación UV-----	19
2.5.-Características técnicas de la lámpara de UV-----	20
2.6.-Circuito electrónico para el control de las lámparas-----	21
2.7.-Análisis de la fuente de alimentación para la lámpara de halógeno-----	23
2.8.-Análisis de la fuente de alimentación para la lámpara de UV-----	25
Capítulo 3	
ADAPTACIÓN DEL MONOCROMADOR AL SISTEMA	
3.1.-El monocromador-----	30
3.1.1. Los filtros ópticos-----	30
3.1.2. Los filtros de interferencia-----	31
3.1.3. El prisma-----	31
3.1.4. La rejilla de difracción-----	31
3.2.-Configuración física de un monocromador-----	31
3.3. Partes ópticas internas del monocromador-----	35
3.3.1. Rejilla de difracción-----	35
3.3.2. Espejo cóncavo del monocromador-----	39

3.3.3. Otros elementos ópticos asociados con el monocromador-----	40
3.3.3.1. Espejos planos-----	40
3.3.3.2. Filtros-----	41
3.3.3.3. Ventanas-----	41
3.3.3.4. Lentes-----	41

Capítulo 4

CONTROL DE POSICIÓN DE LA REJILLA DE DIFRACCIÓN

4.1. El motor de pasos-----	43
4.1.2. Clasificación de los motores de pasos-----	44
4.1.3. Selección del motor de pasos-----	46
4.1.4. Electrónica para alimentar al motor de pasos-----	47
4.2. Sistema para entrada de datos-----	49
4.3. Electrónica empleada para el teclado-----	50
4.3.1. Diagrama de flujo del sistema para entrada de datos-----	52
4.4. Electrónica empleada para el control de posición de la rejilla-----	53
4.4.1. Diagrama de flujo para el control de posición de la rejilla-----	54

Capítulo 5

SISTEMA DETECTOR

5.1. Sensor-----	56
5.2. Clasificación de los sensores de luz-----	56
5.2.1. Detectores fotónicos-----	56
5.2.1.1. Diferentes tipos de transducción fotónica-----	56
5.2.2 Los detectores térmicos-----	58
5.2.2.1. Diferentes tipos de transductores térmicos -----	58
5.3. Selección del sensor-----	58
5.4. Circuito electrónico de la etapa de sensado-----	59

Capítulo 6

ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

6.1. El amplificador logarítmico LOG101-----	62
6.2. Circuito acondicionador de señal-----	62

Capítulo 7

PRESENTACIÓN DE DATOS PARA LECTURA

7.1. Circuito electrónico de la etapa de lectura-----	66
7.2. Valores de componentes-----	67
7.2.1. Resistencia y capacitor de integración (R_{INT} , C_{INT}) -----	68
7.2.2. Capacitor de auto-cero-----	68
7.2.3. Voltaje de referencia-----	69
7.2.4. Resistencia y diodo para corregir la pendiente-----	70
7.2.5. Reloj del conversor-----	70
7.2.6. Tierra analógica y digital-----	71
7.3. Consideraciones importantes del circuito-----	71

Capítulo 8

PRUEBAS AL EQUIPO TERMINADO

8.1. Pruebas eléctricas-----	73
8.2. Pruebas ópticas-----	76

CONCLUSIONES-----	79
BIBLIOGRAFÍA-----	82
APÉNDICE-----	83

INTRODUCCIÓN

El espectrofotómetro que se presenta en este trabajo es un instrumento en el que se mide principalmente la Absorción y/o Transmisión de luz monocromática en una muestra líquida. Con este equipo se pueden analizar muestras para conocer el contenido de algún elemento presente en ellas, así como su cantidad y concentración.

El objetivo principal de este trabajo es el de desarrollar un espectrofotómetro que cuente con el mayor número de componentes que se puedan adquirir en el mercado nacional para que resulte además de económico, fácil de reparar. Con esto será posible que un mayor número de laboratorios incluyendo los de la misma universidad cuenten con este tipo de equipos que son tan importantes para el estudio de muestras.

Cabe mencionar que para el desarrollo de éste, se parte de un monocromador comercial el cual, fue adaptado a las necesidades que se tenían.

El uso de un monocromador comercial que ya está fabricado, obedece a que su diseño y construcción requiere de años de experiencia y el uso de tecnologías sofisticadas para el tallado de espejos y la construcción de rejillas de difracción, no por esto debemos de olvidar que se debe tener un conocimiento básico de óptica para comprender perfectamente qué, y cómo, es lo que queremos medir en este tipo de equipos.

Este trabajo tiene una alta componente de investigación en el tema relacionado con la espectrometría dado que se desconoce, como se mencionó anteriormente, la forma de operar de estos equipos, lo que si se sabe normalmente es operarlos como caja negra.

El diseño de la electrónica contempla el uso de microcontroladores para el manejo de motores de pasos los cuales controlan, entre otras cosas, la posición de la rejilla de difracción y la selección de la muestra a ser leída.

En gran medida se utiliza electrónica analógica para el resto de las funciones que debe de realizar el equipo.

Principalmente fueron desarrollados los sistemas electrónicos tales como: El sistema encargado del manejo de la lámpara ultravioleta y la lámpara del visible, el control de la longitud de onda para el cual se emplearon como ya se dijo, microcontroladores encargados de ajustar la posición de la rejilla de difracción mediante un motor de pasos, la etapa de acondicionamiento de la señal en la cual fue necesario seleccionar los detectores de luz

adecuados y posteriormente amplificar y acondicionar la señal para su correcta interpretación, el despliegue de resultados y el sistema para ingresar datos, que consiste en un teclado apropiado para introducir las ordenes al equipo. En general podemos decir que, su automatización fue hecha apoyándonos en el uso de electrónica de última generación tal como los microcontroladores que últimamente han tenido una gran aplicación en todos los ámbitos.

En el mercado existen muchas marcas de espectrofotómetros pero desgraciadamente su costo es muy elevado dada la complejidad de su funcionamiento y del tipo de estudios tan especializados que se pueden realizar con ellos. Su aplicación es muy amplia, los podemos encontrar desde un laboratorio en una universidad, esto es, que pueden tener un uso meramente didáctico, hasta en los laboratorios de hospitales, en este caso se utilizan para salvar vidas.

La necesidad de desarrollar un espectrofotómetro propio que se pueda reproducir en serie, surge de la necesidad de que en el país no existe un fabricante que pueda proveer equipos suficientes a un costo accesible para la mayoría de los usuarios potenciales, tales como alumnos y profesores de carreras científicas que se imparten en facultades y escuelas de las universidades del país.

Es debido a lo anterior que en sus laboratorios no cuentan con los equipos suficientes para el desarrollo de prácticas, limitando la aplicación de sus conocimientos por falta de equipo suficiente. Se hace necesario llenar este vacío dado que el desarrollo científico y tecnológico está cimentado en la experimentación, de esta forma, los científicos y futuros científicos tienen la necesidad de medir todas sus variables para poder comprobar sus teorías. Comprar en el extranjero varios de estos equipos para resolver esta necesidad resultaría demasiado caro para cualquier institución.

El desarrollo de cualquier equipo, sin excluir el presente, involucra el conocimiento de muchas disciplinas así como un alto grado de investigación de muchos temas que podrían ser desconocidos pero básicos para obtener resultados adecuados, es por esto que en cada bloque que comprende a este equipo se presenta una explicación de los conceptos que están involucrados para así tener los mejores resultados.

La mayoría de los instrumentos de medición en general, están integrados por varias etapas, tales como: Un sensor, que se encarga de generar una señal medible; un sistema de

transducción, que se encarga de convertir la señal medible en otra que se pueda procesar por el equipo, en nuestro caso en una señal de voltaje o de corriente; el amplificador de la señal, el cual le proporciona un nivel óptimo a la señal para que se pueda procesar adecuadamente y no se pierda; el acondicionador de la señal, el cual presentará finalmente un equivalente de la señal medida en una señal que pueda ser interpretada por el último bloque que sería el despliegue de la lectura, ésta debe ser presentada de una manera clara tal como un indicador digital o un medidor mecánico.

El esquema presentado anteriormente no es rígido dado que algunos equipos pueden tener algunas variantes.

CAPÍTULO 1

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

En este capítulo se presentan los principios básicos involucrados en el proceso de absorción de luz. Este capítulo es elemental para comprender el fenómeno físico en el que se basa el funcionamiento de un espectrofotómetro.

1.1. Espectroscopia

La espectroscopia es un método óptico de análisis químico.

Los métodos ópticos de análisis miden la radiación electromagnética que emana o interactúa con la materia. Estos métodos miden la radiación que puede ser reflejada, difractada, refractada, polarizada o dispersada por la materia al interactuar con la radiación electromagnética^[4]. A su vez los métodos ópticos se dividen en Espectroscópicos y no Espectroscópicos. Los Espectroscópicos se dividen a su vez en Espectroscópicos de absorción cuando miden la radiación absorbida por átomos moléculas o iones y los Espectroscópicos de emisión cuando miden la radiación emitida por átomos moléculas o iones. Por otro lado, dependiendo del tipo de radiación absorbida o emitida pueden ser de absorción de rayos X, absorción en ultravioleta, absorción en el visible, absorción en el infrarrojo, etc. Para los de emisión se pueden tener emisión de rayos X, fluorescencia atómica, fluorescencia molecular, fluorescencia en el visible, fluorescencia en el infrarrojo etc.

Por otro lado los métodos no espectroscópicos miden cambios que ocurren en la dirección de propagación de la luz, entre estos podemos tener la refractometría, polarimetría, etc.

1.2. Clasificación de los espectrofotómetros

Partiendo de lo expuesto en el párrafo anterior los espectrofotómetros se pueden clasificar de acuerdo a su forma de operar de la siguiente forma:

Absorción.- En este tipo, la luz procedente de una fuente, se convierte en luz monocromática, cuya longitud de onda es ajustable y conocida siempre que atraviesa la muestra. En la muestra ocurrirá una *absorción* y los correspondientes cambios de luz son sentidos por el fotodetector. De esta forma queda establecido el espectro de absorción al hacer una gráfica de la intensidad luminosa incidente en el fotodetector contra la longitud

de onda. Las características espectrales de la fuente de luz, fotodetector y todos los elementos ópticos internos deben ser conocidas y consideradas en la lectura final.

Emisión.- La diferencia principal con el de absorción es que no tiene una fuente luminosa y la ubicación de la muestra es diferente. La luz policromática de la muestra (calentada) se dirige al monocromador, que barre sobre la región espectral especificada proporcionando luz monocromática al fotodetector, a longitudes de onda conocidas e intensidades indicativas del espectro de emisión.

Fluorescencia.- En este tipo son seleccionadas longitudes de onda de luz monocromática a partir de la emisión de una fuente de luz (que emite en una región espectral, incluyendo UV). La luz monocromática proveniente del monocromador de excitación es dirigida sobre la muestra, en la que se presentará *fluorescencia* para ciertas longitudes de onda de excitación. Entonces se analiza el contenido espectral de la luz *fluorescente*, que es policromática, mediante el monocromador de emisión junto con el detector.

El equipo propuesto en este trabajo es del tipo de absorción dado que se detecta mediante un sensor la luz monocromática transmitida por la muestra y por consiguiente la absorbida en ella.

En la Tabla (1.1) se muestra una clasificación de las técnicas espectroscópicas en función de la región del espectro electromagnético en el que se trabaja. En esta tabla a su vez se muestra el tipo de transición cuántica involucrada en el método correspondiente, esto debido a que cada ión, átomo o molécula presenta un conjunto individual de niveles de energía, por lo que absorberá solamente radiación de una frecuencia que corresponda a la excitación de un nivel de energía a otro.

Tipo de espectroscopia	Intervalo habitual de longitud de onda	Intervalo habitual de número de onda (cm ⁻¹)	Tipo de transición cuántica
Emisión de rayos gamma	0.005-1.4 Å	*****	Nuclear
Absorción, emisión, fluorescencia y difracción de rayos X	0.1-100 Å	*****	Electrones internos
Absorción ultravioleta de vacío	10-180 nm	10 ⁵ a 5*10 ⁴	Electrones de enlace
absorción, emisión y fluorescencia ultravioleta visible	180-780 nm	5*10 ⁴ a 1.3*10 ⁴	Electrones de enlace
Absorción y dispersión Raman infrarroja	0.78-300 µm	1.3*10 ⁴ a 3.3*10 ¹	Rotación/vibración de moléculas
Absorción de microondas	0.75-3.75 mm	13 a 27	Rotación de moléculas
Resonancia de Espín	3 cm	0.33	Espín de los electrones en un campo magnético

Tabla 1.1. Clasificación de algunas técnicas espectroscópicas.

Con base en lo anterior se puede decir que la espectroscopia estudia los “Espectros de las sustancias” y la relación entre la absorción y/o la emisión de luz con la estructura de la materia. La finalidad de esta tabla es la de ubicarnos en la región del espectro en la que trabaja el espectrofotómetro propuesto y así darnos una idea del número de variantes que pueden existir. Más aun, en ésta región todavía se puede hacer otra clasificación de los espectrofotómetros desde un punto de vista más específico, tal como se muestra a continuación:

XUV.- Espectrofotómetros de ultravioleta extremo (10-200 nm)

UV.- Espectrofotómetros de ultravioleta (200-380 nm)

VIS.- Espectrofotómetros de luz visible (380-780 nm)

NIR.- Espectrofotómetros de infrarrojo próximo (780-3000 nm)

MIR.- Espectrofotómetros de infrarrojo medio (3000-15000 nm)

FIR.- Espectrofotómetros de infrarrojo lejano (15000- 800000 nm)

El espectrofotómetro propuesto en este trabajo comprende los marcados con UV y VIS dado que su funcionamiento esta limitado a las longitudes de onda entre 200 y 780nm.

1.3. Dualidad de la luz

En este punto es conveniente mencionar que a la luz la podemos tratar como onda o como partícula, solamente de esta forma podemos explicar los diferentes fenómenos que se producen en el funcionamiento del equipo. De esta manera la reflexión, refracción, difracción y efectos similares se pueden explicar si consideramos a la luz como una onda, la figura (1.1) muestra esquemáticamente a la luz como una onda. Por otro lado los efectos fotométricos sugieren que la radiación electromagnética (luz), está compuesta por partículas discretas de energía (fotones). La figura (1.2) muestra esquemáticamente la diferencia de energía entre dos fotones que tienen diferentes frecuencias.

Las unidades de longitud de onda empleadas son el micrómetro (10^{-6} m), nanómetro (10^{-9} m) y el angstrom (10^{-10} m), su relación con la frecuencia se da en términos de la velocidad de la luz, la cual depende del medio de propagación^[5], en nuestro caso se considera el vacío por lo tanto se tiene que:

$$C = \lambda \cdot \nu \text{-----(1.1)}$$

Donde:

$$C = 2.99 \times 10^{10} \text{ cm/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

ν = frecuencia Hz.

En ocasiones es más fácil clasificar la radiación electromagnética en términos de frecuencia. Por ejemplo 250 nm. corresponde a 1.2×10^{15} Hz, para lo cual la relación (1.1) es muy útil.

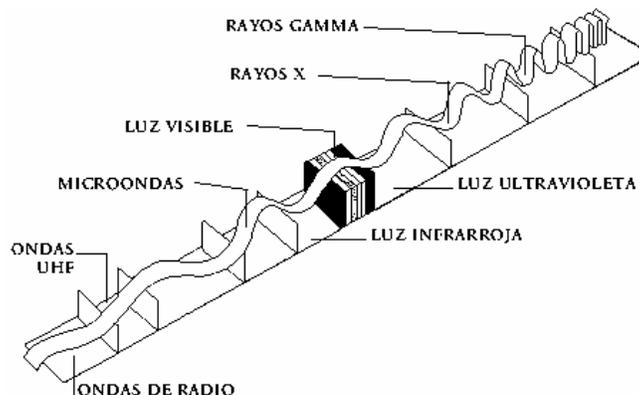


Figura 1.1. La luz puede se vista como una onda electromagnética.

Observaciones empíricas demuestran que algunas formas de radiación son más energéticas que otras; así, tenemos que la luz visible es más tolerable que los rayos en el cercano ultravioleta los cuales causan quemaduras como las provocadas por el Sol. Podemos decir que longitudes de onda corta o radiación de alta frecuencia es más energética que longitudes de onda larga o baja frecuencia, esto se puede observar más fácilmente con la ecuación de la energía cinética asociada con un fotón figura (1.2) propuesta por Planck, la cual se expresa como^[5]:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \text{-----(1.2)}$$

Donde:

E es la energía cinética (J)

h es la constante de Planck = 6.62×10^{-34} (J.s)

ν Es la frecuencia (ciclos/s)

c es la velocidad de la luz (3×10^{10} cm/s)

λ Es la longitud de onda (nm)

En esta ecuación podemos observar que la energía es directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda, lo cual quiere decir que a mayor frecuencia mayor energía y por otro lado a longitudes de onda grandes menor energía.

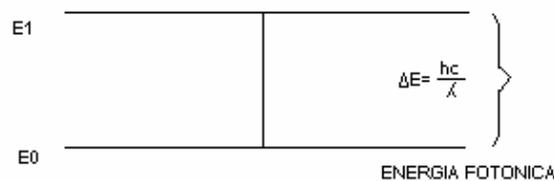


Figura 1.2. Diferencia de energía entre dos fotones.

1.4. Interacción de la luz con la materia

Cuando un haz de luz incide en un medio semitransparente se puede observar que tiene pérdidas en su intensidad al atravesarlo. Se pueden tener pérdidas despreciables por reflexión y por dispersión debida al cambio de índice de reflexión y por otro lado a que la

muestra no es homogénea. Sin embargo, las pérdidas de mayor peso son aquellas debidas a la absorción de luz de cierta frecuencia por la muestra, esto se refleja como un cambio de energía en las moléculas o iones que componen la mezcla. Este cambio no es fácil de medir.

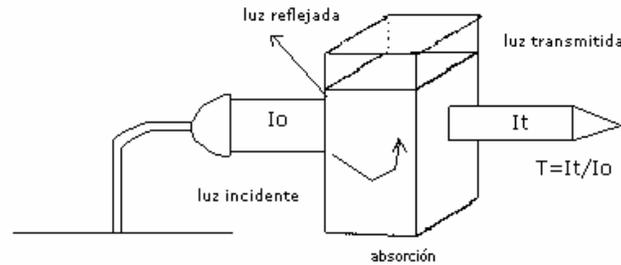


Figura 1.3. Interacción de la luz con la materia.

Sin embargo, si se graficara la intensidad de luz transmitida en función de la longitud de onda, se obtendría un espectro de absorción de la sustancia, siendo esta absorción selectiva, la base de la espectroscopia para realizar análisis cuantitativos y cualitativos. Esto quiere decir, que podemos conocer que hay y en que concentración se encuentra determinado elemento en una muestra, dado que cada elemento absorbe luz de manera distinta.

En la figura (1.3) se puede observar que la potencia del rayo de luz incidente no es la misma que la potencia del rayo de luz a la salida de la muestra, además esta potencia de salida también cambia dependiendo del tipo de luz que se esté utilizando.

Es así que, como la absorción no es una medida directa, se debe determinar a partir de la potencia radiante que entra y sale de la muestra en estudio.

La potencia radiante es la energía de radiación (luz) en un área dada por segundo.

1.5. Ley de Beer-Bougner

Esta ley describe que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración y al espesor de la celda^[8] y la podemos expresar como:

$$A = abc \text{-----(1.3)}$$

Donde:

a = absorptividad

b = espesor de la muestra

c = concentración

La absorptividad (a) es una característica de cada sustancia bajo ciertas condiciones como temperatura, solvente utilizado, etc. Podemos decir, en una forma coloquial, que es una medida de la fuerza de absorción molar de una sustancia a una determinada longitud de onda. Si el espesor de la celda se da en centímetros y la concentración en gramos por litro, entonces las unidades de la absorptividad serán litros por centímetro sobre gramo.

Con esto nos podemos dar cuenta que la absorbancia depende de la naturaleza del medio, o sea de su composición.

Otro parámetro del que depende la absorbancia, como podemos apreciar en la ecuación, es la longitud del camino óptico en el medio, en este caso representado por (b).

Para que esta ley sea válida tenemos que considerar lo siguiente:

- Que la luz sea monocromática
- Los iones y moléculas actúan independientemente sin importar su número y forma
- La absorción está limitada a un volumen de sección eficaz uniforme.

Por otro lado, si definimos la transmitancia como la razón entre la potencia que sale de la muestra y la potencia que entra y aplicamos el logaritmo se tiene que^[8]:

$$\log \frac{P}{P_0} = \log T \text{ -----(1.4)}$$

Esto lo podemos intuir fácilmente si colocamos una serie de celdas idénticas y hacemos que un haz de luz las atraviese. Si en la primera entran 100 fotones y solamente salen 50 suponiendo que los podemos medir, entonces la transmitancia será:

$$T = \frac{50}{100} = 0.50 \text{ -----(1.5)}$$

En las siguientes celdas será consecutivamente 0.25, 0.125, 0.062, 0.031, 0.015

Graficando estos valores da como resultado la curva de la figura (1.4), este efecto del espesor como variable es similar a si tomamos a la concentración como variable y al combinarlos podemos expresarlo con la ecuación (1.6)

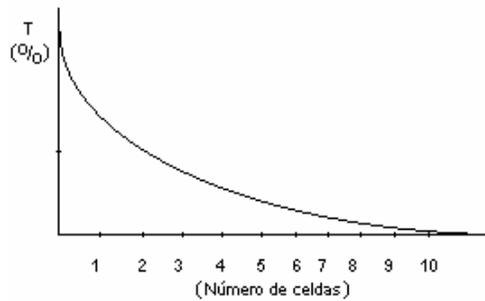


Figura 1.4. Efecto del espesor en la transmitancia.

$$T = \frac{P}{P_o} = 10^{-abc} \text{-----(1.6)}$$

Si tomamos el recíproco de la razón P/P_o se tiene:

$$\frac{1}{T} = \frac{P_o}{P} = \frac{1}{10^{-abc}} \text{-----(1.7)}$$

Aplicando las leyes de los logaritmos y combinando con la ecuación (1.3) se tiene que:

$$abc = \log \frac{P_o}{P} = -\log \frac{P}{P_o} = -\log T = A \text{-----(1.8)}$$

Esta es la forma más simple de expresar la ley de Beer.

La concentración se puede obtener directamente con la ley de Beer-Bouguer conociendo la absorbancia y la absortividad tal como se indica en la ecuación (1.9)

$$C = \frac{A}{ab} \text{-----(1.9)}$$

En esta ecuación podemos ver que la Absorbancia tiene una relación lineal con la concentración y el camino óptico, es debido a esto que la lectura de Absorbancia es muy empleada en estos equipos.

1.6. Instrumento para medir la absorción de Luz

Los espectrofotómetros esencialmente proveen una banda estrecha de radiación espectral a la que se le conoce como luz monocromática, la hacen incidir sobre una muestra para posteriormente detectar la radiación que logra pasar. De esta forma, el instrumento relaciona principalmente dos variables, la potencia radiante absorbida o transmitida por la muestra y la longitud de onda de la luz incidente sobre ella. Lo anterior debido a que la absorbancia o transmitancia está en función de esta última.

La figura (1.5) muestra un tipo de espectrofotómetro comercial.



Figura 1.5. Espectrofotómetro comercial.

Para poder lograr el objetivo mencionado en el párrafo anterior se necesita que el instrumento contenga varios componentes como son:

- Fuente de radiación (luz)
- Monocromador
- Detector
- Amplificador / Acondicionador de señal
- Lector para la medida de absorbancia y transmitancia

La figura (1.6) muestra un diagrama a bloques de los componentes antes mencionados^[2]

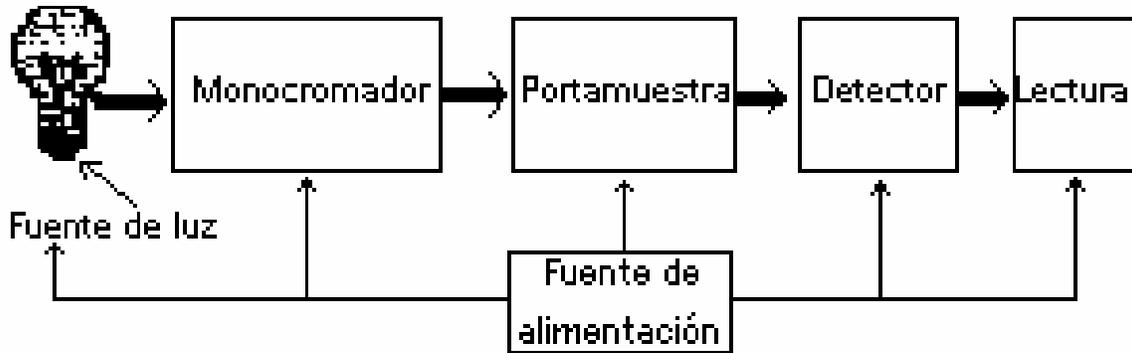


Figura 1.6. Diagrama a bloques de los componentes de un espectrofotómetro.

En los capítulos siguientes se trata en forma separada cada uno de los bloques arriba presentados. Se comienza por el diseño de las fuentes de luz y su electrónica asociada; la manera en la que se adaptó el monocromador al sistema y como se automatizó mediante un motor de pasos; posteriormente, se analiza el sensor empleado en el diseño y finalmente se presenta la forma en la que se acondicionó la señal, también en uno de los capítulos se trata la forma en la que se presentan los datos para su lectura.

Al final del trabajo se presentan algunos resultados obtenidos con el equipo completamente terminado y ensamblado.

CAPÍTULO 2

FUENTES DE ALIMENTACIÓN PARA LAS LÁMPARAS

En este capítulo se realiza un análisis de las lámparas empleadas en el espectrofotómetro así como el de la electrónica necesaria para alimentar estos elementos, los cuales son fundamentales en este diseño.

2.1. Fuente de radiación visible

El primer elemento a analizar es la fuente de luz la cual debe de producir idealmente una radiación intensa sobre un rango espectral lo mas amplio que se pueda.

En las lámparas modernas, el filamento por lo general es un hilo fino de wolframio (Tungsteno). Para reducir la evaporación del filamento se introduce un gas inerte como el argón. Se sabe que todos los cuerpos emiten radiación electromagnética a causa de la agitación térmica de sus moléculas, esta radiación se denomina radiación térmica, la cual consiste en una mezcla de diferentes longitudes de onda.

Las lámparas de filamento de Tungsteno^[4] son empleadas comúnmente como fuente de luz visible, proporcionan una radiación continua con pequeños cortes de longitud de onda dependiendo del material que las recubre, si este es de vidrio se tendrá gran absorción por debajo de 350(nm) y por debajo de 300(nm) si son de sílice. Es debido a esto que este tipo de lámparas son usadas en el rango de 300(nm) a 2500nm

Idealmente las fuentes de luz empleadas en espectrometría deben proveer una radiación intensa y estable sobre un rango espectral amplio, tener un tamaño razonable, ser robustas, tener una larga vida y ser económicas.

La tabla (2.1) muestra diferencias entre una lámpara de tungsteno y un de halógeno. Se pueden apreciar las ventajas y desventajas de una sobre otra de acuerdo a las características mencionadas anteriormente.

Lámpara	Tamaño	robusta	vida	costo	rango de emisión	intensidad
tungsteno	medio	poco	corta	bajo	350nm-2500nm	poca
halógeno	pequeño	mucho	larga	regular	300nm-2500nm	mayor

Tabla 2.1. Tabla comparativa entre una lámpara de halógeno y una de tungsteno.

Finalmente, la lámpara empleada en este diseño fue una lámpara Philips de halógeno de 6V y 10W de potencia, esto debido a que este tipo de lámpara cumple con la mayoría de las características mencionadas anteriormente y supera a una de tungsteno convencional.

2.2. Ciclo de regeneración del halógeno

En las lámparas incandescentes normales, con el tiempo, se produce una disminución de la intensidad luminosa. El hecho anterior es debido a que el recubrimiento se torna oscuro causado por la evaporación de partículas de wolframio del filamento. Agregando una pequeña cantidad de un compuesto gaseoso con halógenos^[4] (cloro, bromo o yodo) al gas de relleno, se establece un ciclo de regeneración del halógeno que evita que el recubrimiento se oscurezca, este hecho se puede apreciar en la figura (2.1). Cuando el tungsteno (W) se evapora se une al bromo formando el bromuro de wolframio (WBr_2). Como las paredes de la bombilla están muy calientes (más de 2600 °K) no se deposita sobre estas y permanece en estado gaseoso. Cuando el bromuro de wolframio entra en contacto con el filamento, que está muy caliente, se descompone en W que se deposita sobre el filamento y Br que pasa al gas de relleno. Y así, el ciclo vuelve a empezar.

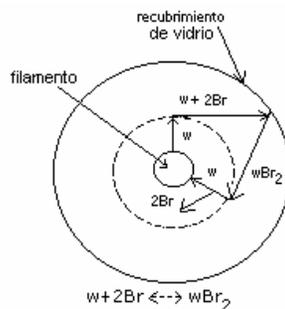


Figura 2.1. Ciclo de regeneración del halógeno.

El funcionamiento de este tipo de lámparas requiere de temperaturas muy altas para que pueda realizarse el ciclo del halógeno. Por eso son más pequeñas y robustas, además el recubrimiento se fabrica con un cristal especial de cuarzo por lo que no es recomendable tocarla con las manos para evitar su deterioro. Este tipo de lámparas tienen cierta emisión en la región de UV la cual no es bloqueada por el cuarzo, de aquí que no es recomendable exponerse directamente a su brillo y mucho menos verla directamente sin uso de lentes apropiados para evitar daños.

2.3. Espectro de emisión de una lámpara de halógeno

En la figura (2.2) se puede ver una gráfica aproximada del espectro de emisión de una lámpara de halógeno^[7], como se puede apreciar, la mayor energía de emisión se encuentra principalmente en la región visible e infrarrojo cercano.

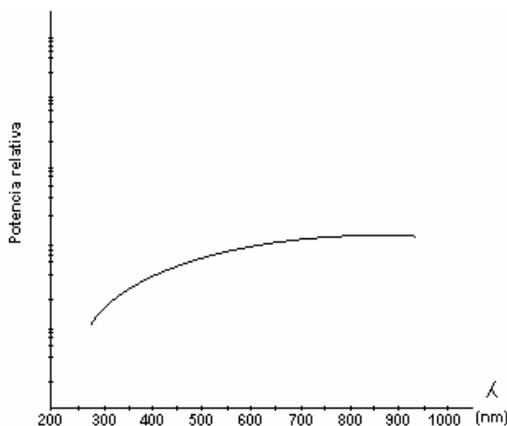


Figura 2.2. Espectro de Irradiancia de una lámpara de Halógeno (100W).

La energía emitida por una lámpara de halógeno es proporcional al voltaje de alimentación; por lo tanto, si queremos una emisión estable, el voltaje debe ser también estable.

Para el control de ésta lámpara se empleó un regulador electrónico de voltaje realimentado con el fin de asegurar una buena estabilidad en la intensidad luminosa. En el circuito propuesto se controla implícitamente la corriente al controlar el voltaje de la lámpara, es por esto que como ya se dijo, este es el factor más importante para lograr una intensidad estable.

Para tal fin se empleó un regulador LM723 el cual se configuró para proporcionar un voltaje de salida de 6(V) tal como se muestra en la figura (2.6).

2.4. Fuente de radiación UV

Como se ha venido mencionando, es importante que la potencia de luz no cambie abruptamente en el rango de longitud de onda empleado. La lámpara de Deuterio produce un espectro continuo de UV abarcando desde 190nm hasta 375nm^[7], esto lo podemos apreciar en la figura (2.3) en la que se muestra el espectro de emisión del deuterio, como se puede observar, presenta una emisión continua por debajo de los 400nm.

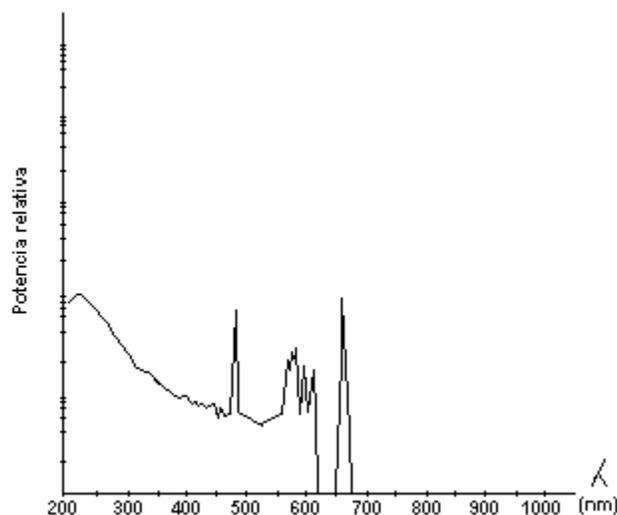


Figura 2.3. Espectro de Irradiancia de una lámpara de deuterio (50W).

En la construcción de la cubierta de estas lámparas se debe emplear cuarzo, al igual que en las cubetas (portamuestras) empleadas cuando se trabaja en estas frecuencias debido a que el vidrio absorbe radiaciones por debajo de 350 (nm).

La figura (2.4) ilustra la lámpara utilizada en el diseño.

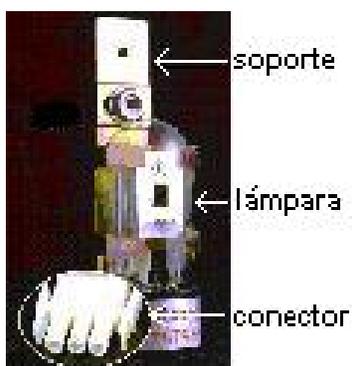


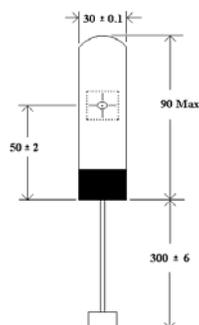
Figura 2.4. Lámpara de Deuterio.

2.5. Características técnicas de la lámpara de UV

La tabla (2.2) muestra las características eléctricas de la lámpara de UV utilizada y la figura (2.5) muestra sus dimensiones físicas, ambas fueron obtenidas de las hojas de especificaciones del fabricante que en este caso es Perkin Elmer.

Lámpara de arco de Deuterio (P712, 3 V)

DATOS ELECTRICOS		
Voltaje de filamento	Arranque	5(V) VDC
	Operación	2-3(V) VDC
Voltaje de descarga	Arranque	>350(V)VDC
	Operación	120-140(V)VDC
Corriente de ánodo		10-300mA
Conexiones	Negro	Fil. Y Cátodo
	Rojo	Ánodo
Terminales		3
DATOS OPTICOS		
Material de la ventana		Transmite UV
Apertura de la fuente		1mm de diámetro

Tabla 2.2. Características eléctricas de la lámpara de deuterio seleccionada.**Figura 2.5 Esquema y dimensiones de la lámpara de Deuterio en mm.****2.6. Circuito electrónico para el control de las lámparas**

Para proporcionar la estabilidad necesaria en las dos fuentes de luz se emplean principalmente dos circuitos integrados reguladores de fácil adquisición en el mercado nacional, su configuración es tal que cualquier variación en su salida es inmediatamente compensada por realimentación del circuito. Como se puede ver en el esquema de la figura (2.6), la lámpara de UV requiere de un voltaje elevado entre placa y filamento para ionizar el gas, posteriormente se alimenta el filamento instantáneamente (entre cinco y seis

segundos) para formar una nube electrónica alrededor del filamento y así lograr establecer una corriente con la placa. Una vez establecida la corriente, el alto voltaje se ajusta a la nueva carga, la corriente se regula mediante un transistor que está controlado con un circuito regulador LM723.

Por otra parte, como se puede ver en la misma figura(2.6), el circuito de control de intensidad de la lámpara de halógeno esta construido básicamente con un circuito regulador LM723. Internamente este circuito está formado por un amplificador de referencia compensado en temperatura, un amplificador de error, un transistor de paso de 150 mA y un circuito limitador de corriente, ver figura (2.7).

Las configuraciones externas empleadas para cada una de las fuentes de luz, son las típicas que el fabricante sugiere para regulación de voltaje solamente que se les ha agregado un transistor para proporcionar la corriente necesaria a la carga.

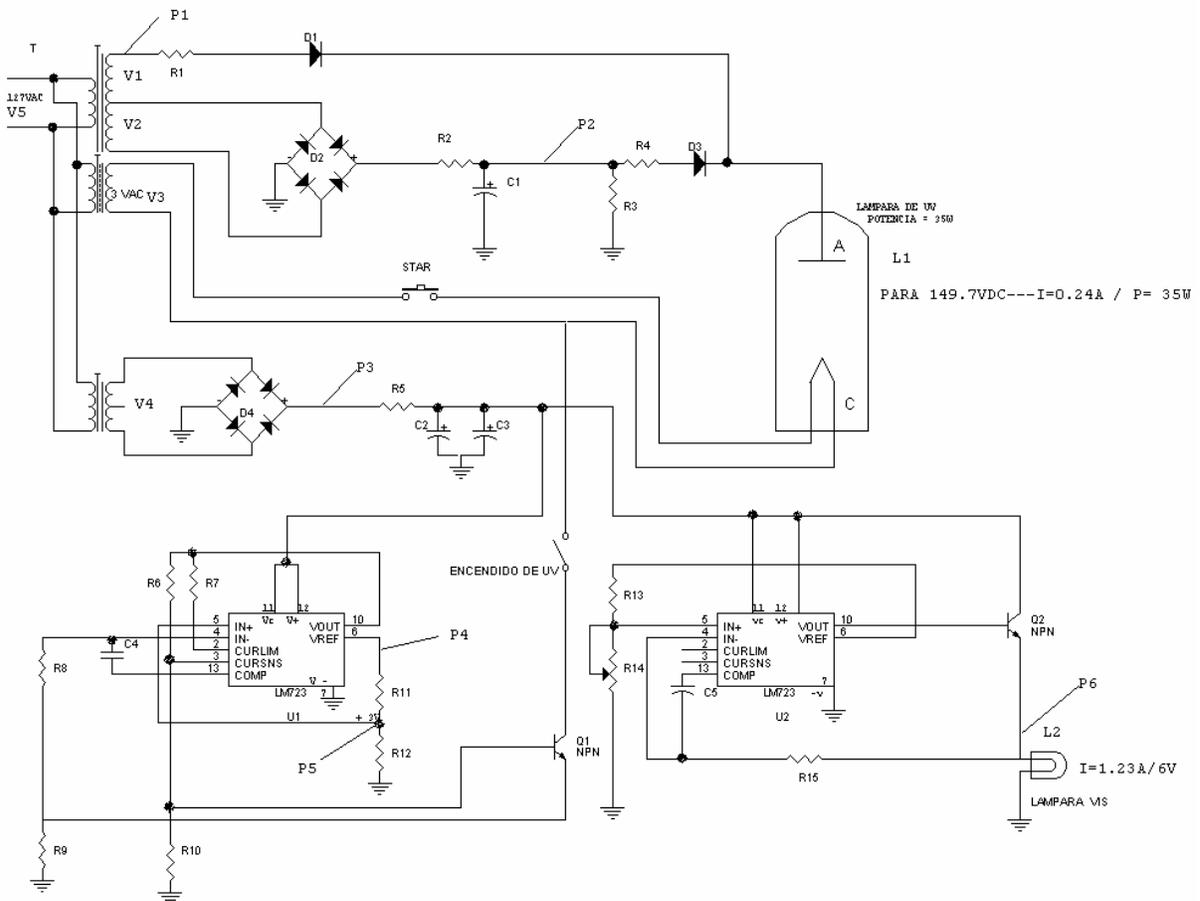


Figura 2.6. Circuito electrónico de las fuentes de luz UV y VIS.

2.7. Análisis de la fuente de alimentación para la lámpara de halógeno

Para tener una mejor idea de como está trabajando el circuito encargado de controlar esta lámpara, se dibujó nuevamente en la figura (2.7). En esta figura se presenta la configuración externa e interna del LM723.

Este circuito integrado, como se puede apreciar, cuenta con una fuente de referencia. A su vez este voltaje, por lo general, o el voltaje derivado de él mediante un arreglo externo, es aplicado a la entrada no-inversora de un amplificador de error. Por otro lado, a la entrada inversora se le aplica una señal proporcional al voltaje de salida, de esta manera se forma un lazo de realimentación.

La etapa de salida debe compensarse con un capacitor conectado entre esta terminal y tierra o la entrada inversora. Se recomienda que la compensación sea con un capacitor de $0.005 \mu\text{f}$ cuando se tenga ganancia unitaria. Si se quiere que la salida sea mayor que el voltaje de referencia es necesario incrementar la ganancia de lazo y el capacitor de compensación deberá entonces reducirse proporcionalmente al incremento de ganancia.

La limitación de corriente se logra por medio de un resistor sensor de corriente de salida. Cuando la corriente alcanza un nivel no deseado, la caída de voltaje en el resistor sensor (R_{sc}) hace que entre en conducción un transistor interno derivando parte de la corriente de base en el transistor de la etapa de salida.

El voltaje a la salida del U_2 para la fuente de halógeno se ajustó a $6.7(\text{V})$, para poder proporcionar $6(\text{V})$ en las terminales de la lámpara de halógeno, considerando la caída de voltaje V_{BE} en el transistor Q_2 . El voltaje de referencia en el circuito integrado es de $7(\text{V})$.

Esta parte del sistema electrónico trabaja como una fuente de voltaje fijo realimentado, ya que como se mencionó anteriormente, para mantener una intensidad constante en la lámpara incandescente se necesita una corriente regulada.

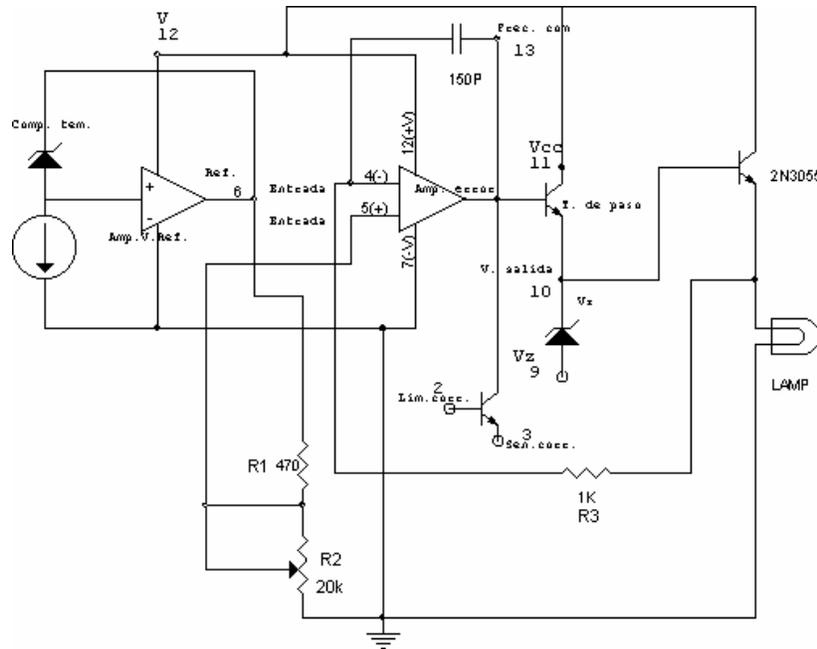


Figura 2.7. Fuente para lámpara de halógeno considerando el LM723 interno.

Para el cálculo del voltaje de salida se empleó la ecuación que se proporciona en las hojas de especificaciones del circuito integrado y corresponde a la ecuación (2.1)

$$V_o = V_{REF} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{-----(2.1)}$$

Esta ecuación es válida para un voltaje de salida entre 2V y 7V. Si elegimos un valor comercial de $R_{13} = R_1$ de 470Ω y despejamos $R_{14} = R_2$ se tiene que:

$$R_2 = \frac{V_o \times R_1}{V_{REF} - V_o} \text{-----(2.2)}$$

Sustituyendo valores se obtiene que $R_{14} = R_2 = 10.4K\Omega$, pero como no existe un valor comercial de este tipo se colocó un potenciómetro de $20K\Omega$ y se ajustó al valor deseado.

Como no hay restricción de corriente dado que la mayor corriente circula por el transistor externo se dejaron sin conexión las terminales 2 y 3.

El capacitor de 150p mostrado en el diagrama es sugerido en las hojas de especificaciones y como ya se mencionó es para compensación de frecuencia.

La resistencia $R_3 = R_{15}$ de $1K\Omega$ que llega a la terminal de entrada inversora del circuito integrado se eligió de este valor dado que solo es para fijar el voltaje de referencia en esta terminal.

R_3 se puede calcular para tener un mínimo efecto en V_o a variaciones de temperatura como:

$$R_3 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \text{-----(2.3)}$$

2.8. Análisis de la fuente de alimentación para la lámpara UV

Sabemos que una fuente de corriente constante es un circuito eléctrico que provee una corriente fija a una carga. De otra forma, se puede decir que la corriente suministrada es independiente de la carga. Hay fuentes de corriente constante que son función de algún voltaje o corriente en el sistema de control y este es el caso de la fuente que aquí se presenta la cual se conoce como fuente controlada. Por otro lado, como sabemos, se tiene que considerar que nunca es posible tener una fuente de corriente constante ideal, aunque sí podemos tener una buena aproximación.

Las fuentes de corriente constante, por lo general usan transistores trabajando en la región activa, por lo que, la corriente que circula por el colector es independiente del voltaje en el colector del transistor. Así tenemos que la juntura BE está en directa y la de CB en inversa, además el voltaje CE debe de ser grande, esto es, más de 0.2V pero menor del voltaje de ruptura.

La fuente de corriente típica llamada de espejo de corriente, se construye con dos transistores, uno de ellos fija un voltaje aproximado de 0.7V en la base del otro para mantenerlo en la región activa. Aplicando este concepto en nuestro caso, el voltaje lo fija el circuito integrado, además se limita la corriente al transistor de salida mediante la configuración que se muestra en la figura (2.9). En esta figura también se muestra la configuración interna del LM723, así como los elementos externos conectados.

En la fuente para la lámpara de deuterio el voltaje en la base del transistor de potencia se calculó para un valor de 3.6 V en operación normal; esto es, cuando el interruptor de encendido de UV se cierra. Cuando está abierto se calculó para 0.35V, suficiente para colocar al transistor en conducción cuando aparece un voltaje en el colector de éste.

Bajo estas condiciones se genera una corriente de 0.24 A en el colector de Q₁ ocasionando que en la lámpara se tenga una corriente constante. Esto es indispensable para mantener una intensidad estable en la lámpara dado que el voltaje en este tipo de lámparas no es regulable, debido a que estamos hablando de una lámpara de descarga de gas.

Al igual que en el cálculo para la fuente de tungsteno se emplearon las ecuaciones proporcionadas en las hojas de especificaciones del circuito integrado para la selección de valores de los componentes empleados, ver ecuación (2.4). Se puede apreciar que es la misma que para el caso anterior..

$$V_o = V_{REF.} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{-----(2.4)}$$

Eligiendo una resistencia R₁= R₁₁ de 4.7KΩ y considerando un V_{REF.} de 7 V, despejando se obtiene el valor de R₂ = R₁₂:

$$R_2 = \frac{V_o \times R_1}{V_{REF.} - V_o} \text{-----(2.5)}$$

Sustituyendo valores:

$$R_2 = 4.97k\Omega$$

Lo que se hizo, fue colocar un potenciómetro de 10KΩ y se ajustó el valor deseado. El fabricante recomienda los valores mostrados en la tabla (2.3).

Para Vo =3V	
R ₁	4.12 KΩ
R ₂	3.01KΩ

Tabla 2.3. Valores de resistencias recomendadas para un voltaje de 3V.

Como podemos ver, nuestros valores calculados son muy aproximados, la razón de no elegir un valor R₁ de 4.12 KΩ es que no es un valor estándar.

Sabemos que la potencia de la lámpara es de 35W. Para el diseño se consideró una corriente de ánodo de 0.25A, por lo tanto, la corriente $I_{CARGA} = 250\text{mA}$ y corresponde a la corriente que circula por el colector del transistor Q_1 .

La corriente de base será dada por la ecuación (2.6).

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.250}{10} = 0.025 \text{-----(2.6)}$$

Esto es considerando la β pequeña que generalmente presentan estos transistores de potencia, la cual puede estar entre 10 y 50.

El valor de la resistencia que limita esta corriente está dado por la ecuación (2.7).

$$R_{SC} = \frac{V_{DETECTADO}}{I_{LIMITE}} \text{-----(2.7)}$$

El valor de $V_{detectado}$ puede obtenerse de la figura (2.8), I_{limite} es la corriente de cortocircuito deseada. Cabe notar que con R_{sc} de un valor cero se puede tener una corriente de salida de 150 mA que es la máxima que puede proporcionar el integrado sin dañarse.

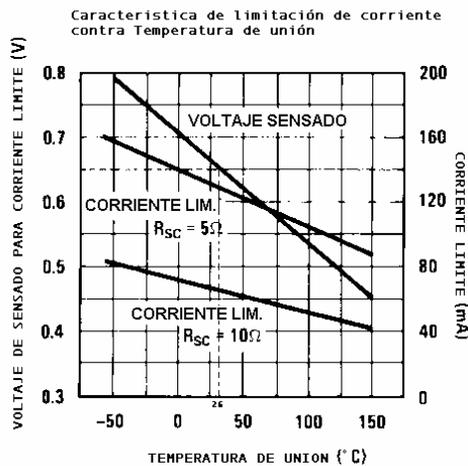


Figura 2.8. Curvas características de limitación de corriente.

Para ajustar esta corriente de base al valor deseado se utiliza la ecuación (2.8).

$$I_{LIM.} = \frac{V_{DETEC.}}{R_{SC}} = \frac{0.65}{R_{SC}} \text{-----(2.8)}$$

Sustituyendo valores y despejando $R_{SC} = R_6$ se obtiene su valor.

$$R_{SC} = R_6 = \frac{0.65}{0.025} = 26\Omega \text{-----(2.9)}$$

Si la β del transistor fuera de 50 entonces se tendría que variar la R_{SC} (más grande) para conservar la misma corriente en el ánodo de la lámpara.

La resistencia R_9 que se emplea para realimentar el circuito, tomando una muestra del voltaje de salida y mandándola a la entrada inversora del amplificador de error se calculó de la siguiente forma :

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.6 - 0.7 = 2.9V \text{-----(2.10)}$$

Este voltaje es realimentado y por lo mismo se conecta a la terminal inversora del amplificador de error.

Como la corriente en el emisor es igual a la corriente del colector más la corriente de base, podemos decir que $I_E = 0.275$ A. Aplicando la ley de Ohm se tiene que:

$$R_E = R_9 = \frac{V_E}{I_E} = \frac{2.9}{0.275} = 10.54\Omega \text{-----(2.11)}$$

Se colocó una resistencia comercial de 12Ω .

Para el cálculo de R_{10} se consideró el caso crítico cuando el transistor Q_1 empieza a conducir, en este punto se considera que se tiene un voltaje $V_B = 0.35V$ y la corriente del circuito integrado en este punto es de $200\mu A$ la cual corresponde a la corriente de fuga Colector-Base del transistor de salida del circuito integrado, por lo que para el calculo de R_{10} se tiene que:

$$R_{10} = \frac{V}{I} = \frac{0.35}{0.0002} = 1750\Omega \text{-----(2.12)}$$

Considerando un valor estándar comercial, se colocó una resistencia de 1.8KΩ.

La resistencia $R_3 = R_8$ se coloca para conectar la entrada no inversora del amplificador de error a la salida y así estabilizar el voltaje de referencia de salida, este voltaje como ya se mencionó es comparado con el voltaje seleccionado en la entrada inversora del amplificador de error.

R_3 se puede calcular para tener mínimo efecto en V_o a variaciones de temperatura como:

$$R_3 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \text{-----(2.13)}$$

Se eligió un valor $R_3 = R_8 = 1.8 \text{ K}\Omega$. por ser un valor estándar.

El fabricante también indica que para voltajes de salida entre 2V y 7V, R_3 puede ser eliminado, esto quiere decir que R_3 puede ser cero.

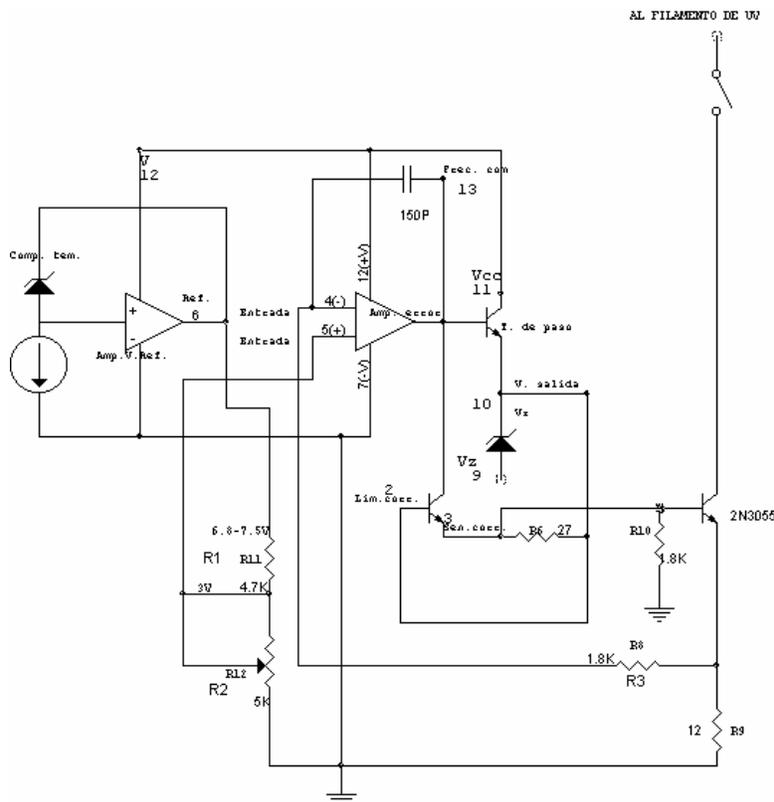


Figura 2.9. Diagrama separado para el control de la lámpara de UV.

CAPÍTULO 3

ADAPTACIÓN DEL MONOCROMADOR AL SISTEMA

El objetivo principal de este tema es el de mostrar como está conformado internamente un monocromador para poder comprender los fenómenos ópticos que están involucrados en su funcionamiento, y de ser posible en algún momento, poder diseñar y construir uno propio.

Como se mencionó al principio, no es la finalidad diseñar un monocromador, sino tomar uno comercial y aplicarlo a nuestras necesidades. Esto, dada la compleja teoría que envuelve el diseño de un elemento de este tipo; por lo mismo, se sale del alcance de este trabajo, sería como tratar de diseñar desde un circuito integrado para poder diseñar un espectrofotómetro pero no por ello se pueden dejar de comprender los conceptos básicos de su funcionamiento.

3.1. El monocromador

Una de las partes más importantes de un espectrofotómetro es su dispositivo dispersor de luz, el cual permite examinar la intensidad luminosa para longitudes de onda o bandas estrechas de longitudes de onda seleccionadas. El monocromador recibe luz policromática a través de una rendija de entrada, modificando esta radiación geométrica y ópticamente, y la dirige a través de una rendija de salida de manera que pueda ser sensada por un fotodetector.

Existen diferentes formas de lograr la finalidad de un monocromador como por ejemplo, los filtros ópticos, filtros de interferencia, el prisma y la rejilla de difracción.

3.1.1. Los filtros ópticos

Se utilizan en los espectrofotómetros más simples. Sin embargo, es necesario señalar que los filtros pueden ser más apropiados que un monocromador en espectroradiómetros de XUV y FIR.

En un disco de filtros pueden situarse varios filtros paso-banda diferentes, situando un filtro específico en el camino óptico rotando el disco hasta una determinada posición.

3.1.2. Los filtros de interferencia

Emplean los principios de interferencia óptica para rechazar la radiación de longitudes de onda que queden fuera de una banda pasante dada, mediante radiación selectiva.

3.1.3. El prisma

Es probablemente el tipo de monocromador más conocido. En este, las longitudes de onda pueden ser seleccionadas moviendo la ranura de salida o rotando el prisma. La dispersión de la luz es causada por los diferentes ángulos de difracción para longitudes de onda distintas. Hay varios diseños diferentes de prismas utilizados en espectrofotómetros. Por ejemplo, el prisma Littrow tiene un espejo situado detrás de él, o bien, su superficie posterior es reflejante (por disposición de una capa de aluminio), de manera que la refracción ocurre dos veces, ya que las ondas refractadas una vez, son refractadas nuevamente tras la reflexión producida en el espejo.

3.1.4. La rejilla de difracción

Es el dispositivo usado últimamente con mayor frecuencia en los monocromadores y es el elemento principal del monocromador empleado en este diseño. Consiste en una placa plana o disco dentro del cual han sido formadas, en su superficie pulida, una gran cantidad de líneas paralelas equidistantes.

3.2. Configuración física de un monocromador

En los monocromadores de rejilla se usan diversas monturas ópticas, en la figura (3.1) se muestran dos disposiciones frecuentemente utilizadas, la montura Czerny-Turner y la Ebert-Fastie^[8]. También existen diversas versiones modificadas de ambas monturas.

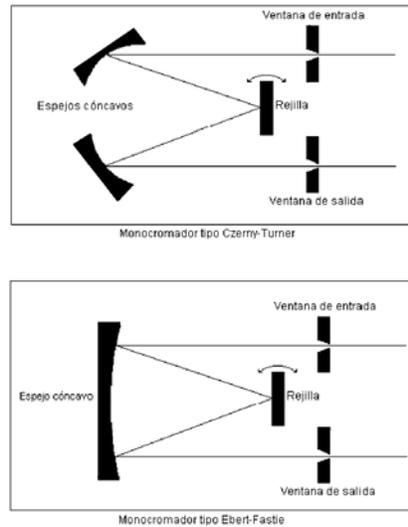


Figura 3.1. Diferentes configuraciones de monocromadores.

La montura empleada en este diseño corresponde a la tipo Ebert-Fastie la cual se muestra en la figura (3.1). Como se puede apreciar, este arreglo solamente emplea un espejo esférico, lo cual facilita la alineación óptica. Esto es muy útil, ya que en estos equipos es necesario realizar constantes ajustes para tener un óptimo desempeño.

Un monocromador comercial está constituido en general, como se puede ver en la figura (3.2), de una fisura de entrada que provee una imagen óptica estrecha de la fuente de radiación, un colimador que alinea la radiación emanada por la fisura de entrada, una rejilla o prisma para dispersar la radiación incidente, un colimador para reformar la imagen de la fisura de entrada en la fisura de salida y una fisura de salida para aislar la banda espectral deseada mediante el bloqueo de la radiación dispersa. De aquí que la función primaria de un monocromador es proveer un haz de energía de radiación monocromática, esto es, que tenga una longitud de onda nominal y un ancho de banda espectral, ver figura (3.2). La salida espectral de algunos monocromadores se usa como una fuente de radiación continua.

Más estrictamente podemos decir que la salida de radiación en el monocromador consiste de un rango de longitudes de onda, con un promedio de longitud de onda del valor indicado en el lector del indicador de longitud de onda en el monocromador.

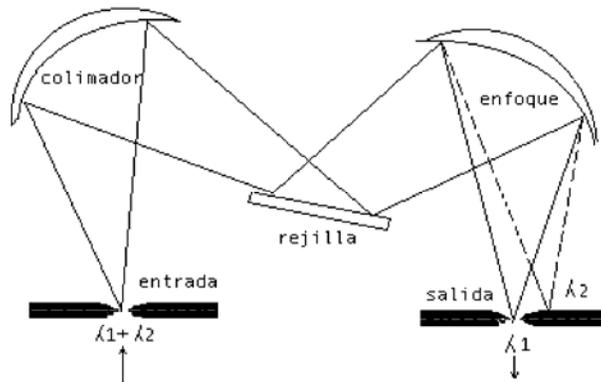


Figura 3.2. Componentes ópticos de un monocromador de rejilla.

Una función secundaria del monocromador es ajustar la energía que circula.

El flujo luminoso que emerge de la fisura de salida puede ser variado mediante el ajuste del ancho de la fisura de salida^[4].

Sin embargo, con el ancho de la fisura también se controla el ancho espectral, así, con un gran ancho en la rejilla se tiene como consecuencia un gran ancho de banda espectral. Por otro lado, pequeñas fisuras ocasionan que se transmita una baja energía afectando la sensibilidad, por lo que la relación señal a ruido se degrada dada la alta ganancia requerida para sensar la señal débil, este hecho se puede apreciar en el esquema de la figura (3.3).

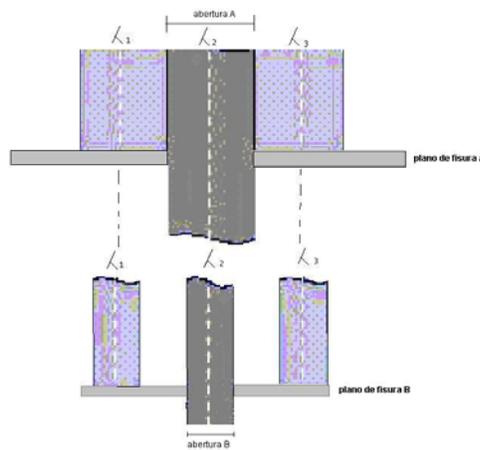


Figura 3.3. Esquema del efecto del ancho de la fisura de salida.

Además, podemos decir que los requerimientos básicos impuestos en un monocromador son diseños simples, buena resolución, rango espectral amplio, pureza en la radiación excitadora y gran dispersión.

De lo anterior podemos apuntar que el desarrollo de un monocromador envuelve tres factores relevantes: resolución, luz potente concentrada y pureza en la radiación de salida.

La resolución depende de la dispersión y de la perfección en la formación de la imagen, mientras que la pureza es determinada principalmente por la cantidad de luz perdida o radiación dispersa. Es necesario tener gran dispersión y alta resolución en el monocromador para poder medir con exactitud la emisión espectral y tener líneas discretas o bandas finas de absorción.

La resolución o poder de resolución de un monocromador es el límite de su capacidad para separar imágenes adyacentes que tienen longitudes de onda ligeramente diferentes. La resolución es determinada por el tamaño y características de la rejilla o prisma, el diseño óptico del dispositivo y de la anchura de la fisura del monocromador.

La definición usada para la resolución (R)^[4] es :

$$R = \lambda/\Delta\lambda = nN \text{-----}(3.1)$$

Donde λ es el promedio de la longitud de onda entre dos líneas y $\Delta\lambda$ es la diferencia de la longitud de onda entre estas líneas, n es conocido como orden de difracción y N es el número de surcos de la rejilla iluminados por la fisura de entrada.

Por otra parte, la dispersión está definida como la capacidad de un monocromador para separar diferentes longitudes de onda. Este fenómeno es llevado a cabo en el monocromador con un prisma (fenómeno de refracción) o con la rejilla (fenómeno de difracción). Una dispersión lineal recíproca D^{-1} es definida como^[4] el rango de longitud de onda sobre la unidad de distancia en el plano focal de un monocromador:

$$D^{-1} = d\lambda/dx \text{-----}(3.2)$$

sus dimensiones son nm/mm.

3.3. Partes ópticas internas del monocromador

El monocromador está conformado por diversos componentes ópticos tales como la rejilla de difracción, el espejo cóncavo y los espejos planos, los cuales vale la pena analizar para conocer sus características principales y de esta manera comprender mejor su funcionamiento.

3.3.1. Rejilla de difracción

En una rejilla se pueden tallar entre 500 y 2500 líneas o surcos por milímetro. El haz de luz incidente se refracta por los surcos. La difracción provoca un esparcimiento de luz desde cada plano en un rango de ángulos. Cada plano se comporta como una fuente puntual de radiación. Para algunos de estos ángulos, la luz de una longitud de onda específica es mucho más intensa que para otros ángulos, debido a las interferencias constructivas (refuerzo). De hecho, la difracción desde el plano produce varios órdenes de espectros. Para un ángulo de incidencia dado, el espectro de difracción de primer orden contendrá un conjunto de longitudes de onda, aumentando con el incremento del ángulo de difracción, el segundo orden contendrá un conjunto de longitudes de onda mitad de las del espectro de primer orden y el espectro de tercer orden contendrá un conjunto de longitudes de onda, cada una de las cuales, para el mismo ángulo de difracción, será una tercera parte de las del espectro de primer orden, y así sucesivamente, la ecuación (3.3) corresponde al comportamiento de este efecto en la rejilla^[2].

$$n\lambda = d(\text{sen}[i] + \text{sen}[r]) \text{-----}(3.3)$$

Donde:

n = orden de difracción

d = constante de la rejilla (nm /surcos)

λ =longitud de onda difractada (nm)

i, r = ángulos de incidencia y de reflexión respectivamente

La figura (3.4) ilustra la manera en la que se lleva a cabo este efecto de difracción.

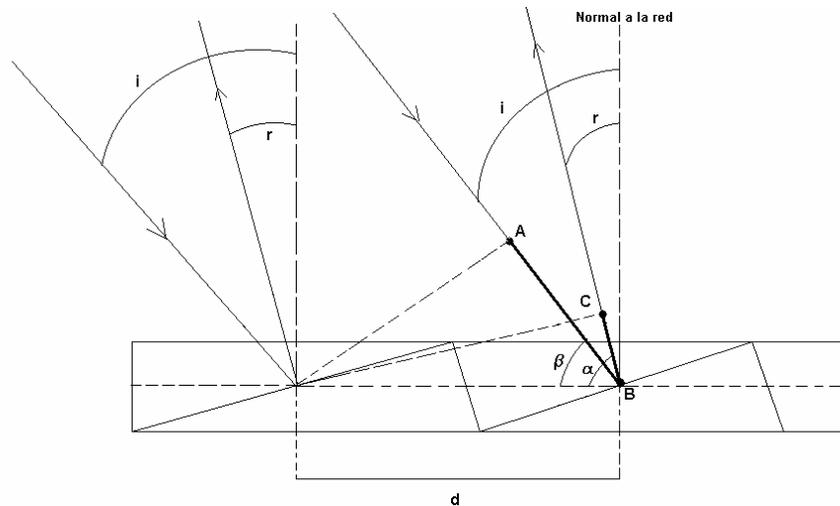


Figura 3.4. Difracción en una rejilla.

Para que exista interferencia constructiva es necesario que los caminos ópticos ABC difieran en un múltiplo entero n de la longitud de onda λ del haz de incidencia.

Las características específicas más frecuentes para monocromadores de rejilla son: el número de líneas por milímetro de la rejilla, la longitud focal, el rango completo de longitud de onda, la resolución obtenible en el espectro de primer orden, y, para la rejilla misma, la longitud de onda de acceso, la longitud de onda (de primer orden) para la que el ángulo de difracción y el ángulo de reflexión son el mismo.

Las rejillas de difracción pueden proporcionar resoluciones superiores a 0.01nm y generalmente se pueden obtener longitudes de onda entre 100nm y 50000nm, extendiendo el rango por debajo de 30nm con algunos diseños uv especiales y llegando hasta 1nm.

La figura (3.5) muestra un tipo específico de rejillas de difracción. Como se puede apreciar existen comercialmente diferentes tipos, en esta figura se presenta una rejilla de difracción de surcos (reglada). Este ingenioso dispositivo se fabrica con una fina herramienta de diamante para formar líneas o surcos paralelos con un cierto ángulo (comúnmente conocido como “blaze angle” en una superficie reflejante. El perfil de los planos difractará el haz de luz incidente con un alto grado de direccionalidad dentro de una porción angosta del espectro.

La rejilla de difracción de este tipo se utiliza cuando se requiere alta eficiencia.

Estas rejillas pueden ser seleccionadas por su tamaño, espacio entre planos y longitud de onda principal. Como ya se vio, teóricamente el poder de resolución es proporcional al

número de líneas por milímetro talladas en la superficie, el “Blaze” o ángulo del tallado determina la longitud de onda o región del espectro donde la rejilla tiene el máximo de eficiencia. Este elemento es de gran importancia para la construcción del monocromador.

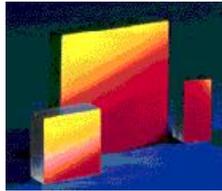


Figura 3.5. Fotografía de una rejilla de difracción comercial.

Las características técnicas de la rejilla que podría cumplir las necesidades de este diseño son las mostradas en la tabla (3.1).

Recubrimiento			AlMgF2	
Tolerancia Dimensional			0.5mm	
Material			vidrio flotado	
Dirección de planos			paralelos	
Eficiencia			60-80%	
Descripción	Tamaño(mm)	Planos por mm	Long. Onda de Diseño	Ang. De plano
Rejilla 12.5x25	12.5x25	600	750	13°
Rejilla 12.5x25	12.5x25	600	400	6°53'
Rejilla 12.5x25	12.5x25	1200	250	8°37'
Rejilla 12.5x25	12.5x25	1200	400	13°53'
Rejilla 12.5x25	12.5x25	600	300	5°09'
Rejilla 12.5x25	12.5x25	1200	500	17°2'

Tabla 3.1 Características físicas de algunas rejillas comerciales.

La curva de respuesta espectral de la rejilla de difracción se muestra en la figura(3.6).

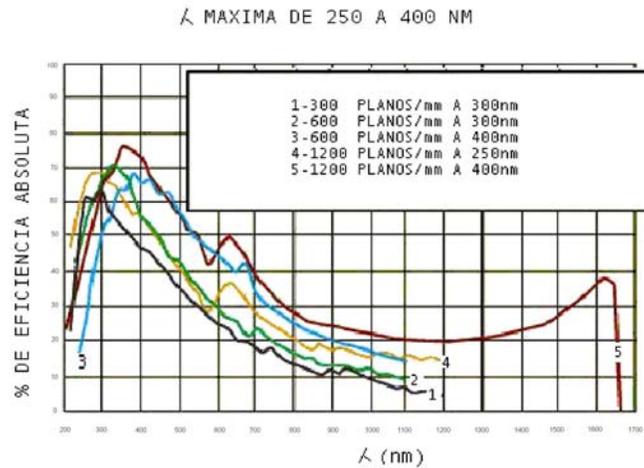


Figura 3.6. Curvas de eficiencia de diferentes rejillas de difracción comercial.

Otro tipo de rejilla existente es la llamada rejilla holográfica, estas rejillas son formadas por la interferencia de campos que ondulan la superficie de un sustrato mediante dos rayos láser a cuyo patrón de onda se exponen estos, se muestra en la figura (3.7).

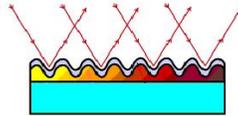


Figura 3.7. Rejilla holográfica.

Existe otro tipo de rejillas, pero que básicamente se emplean para aplicaciones con láser, estas son las rejillas de transmisión, la figura (3.8) muestra este tipo de elementos.

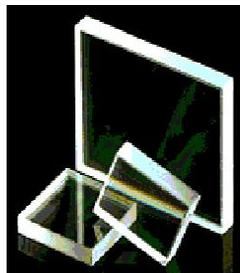


Figura 3.8. Rejilla de transmisión.

3.3.2. Espejo cóncavo del monocromador

Como ya se mencionó, la montura elegida para el monocromador en este diseño es del tipo Ebert-Fastie y se mostró en la figura (3.1). Este arreglo está integrado por diversos componentes ópticos, uno muy importante es el espejo del monocromador.

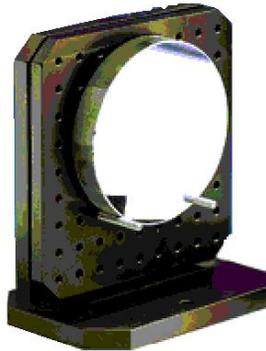


Figura 3.9. Espejo F5 comercial.

Los monocromadores se construyen con una distancia focal específica, usualmente entre $F/2$ y $F/5$ la cual está dada en nuestro caso por el espejo principal del monocromador. En este diseño se trabaja con un monocromador $F5$, un ejemplo de un espejo comercial que lo podría sustituir se muestra en la figura (3.9) y sus características técnicas en la tabla (3.2).

DESCRIPCION	DIA.	DIA.TOLERANCIA	E.F.L	f/#	E.T	SUPERFICIE	REFLEJANTE
	(mm)	(mm)	mm		(mm)	(EXACTITUD)	
espejo esf.UV	50.8	" $+0.5/-0$ "	508	10	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	50.8	" $+0.5/-0$ "	1016	20	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	76.2	" $+1.0/-0$ "	76.2	1	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	76.2	" $+1.0/-0$ "	152.4	2	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	76.2	" $+1.0/-0$ "	203.4	2.7	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	76.2	"$+1.0/-0$"	457.2	6	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	76.2	" $+1.0/-0$ "	762	10	12.7	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	127	" $+1.5/-0$ "	101.6	8	22.86	1/4 onda	aluminio para UV
espejo esf.UV	152.4	" $+1.5/-0$ "	152.4	1	25.4	1/4 onda	aluminio para UV

Tabla 3.2. Características técnicas de espejos comerciales.

Los parámetros más importantes del espejo aquí tratado se muestran en la figura (3.10).

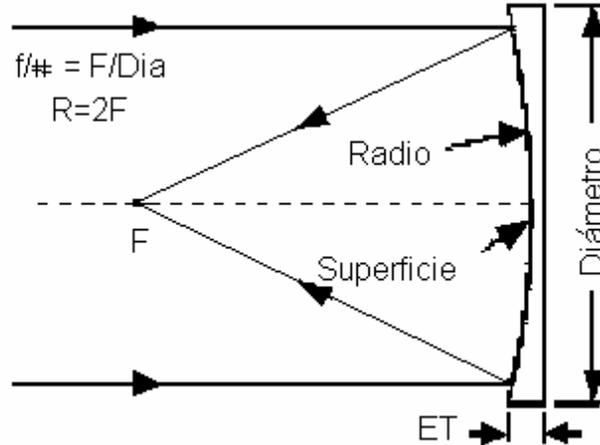


Figura 3.10. Parámetros de un espejo cóncavo.

3.3.3. Otros elementos ópticos asociados con el monocromador

Los elementos ópticos, además de la sección del monocromador con sus rendijas de entrada y de salida, son: ventanas, lentes, espejos planos y parabólicos y divisores de haz. Es importante que todos los elementos ópticos tengan una elevada transmitancia. Los espejos son recubiertos por su superficie frontal, típicamente mediante aluminización; se pueden aplicar recubrimientos sobre la superficie aluminizada para mejorar la reflexión o proporcionar enriquecimiento de UV.

En la tabla (3.3) se muestran características de espejos planos comerciales que podrían emplearse en un monocromador como el utilizado en este diseño.

3.3.3.1.- Espejos planos

Estos elementos son empleados principalmente para desviar el haz de luz en la dirección requerida, algunos tipos comerciales son mostrados en la tabla (3.3).



Material	Pyrex de precisión
Dimensiones(tolerancia)	" $\pm 0.25\text{mm}$ "
Espesor(tolerancia)	" $\pm 0.25\text{mm}$ "
Exactitud(tolerancia)	1/4 onda a 632nm
bordes	0.75mm todo lo ancho
Claro de apertura	85%

DESCRIPCION	TIPO	ESPESOR	MATERIAL	EXACTITUD	ACABADO
	(mm)	(mm)		DE SUPERFICIE	
Epejo,1/4onda,uv,cua.	100x100	15	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cir.	12.5 dia.	2	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cua.	15x15	2	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cua.	20x20	2	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cir.	25 dia.	3	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cua.	25x25	6	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cir.	50 dia.	4	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cua.	50x50	10	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV
Epejo,1/4onda,uv,cua.	75x75	12	pyrex de precisión recocido	1/4 onda a 632nm	alum.reforzada para UV

Tabla 3.3. Características de espejos planos comerciales.

3.3.3.2. Filtros

Los filtros se utilizan para limitar la respuesta espectral del sensor (a veces en combinación con una ventana) a una banda de longitud de onda deseada. También son empleados para calibración.

3.3.3.3. Ventanas

Las ventanas son los componentes ópticos de un sistema sensor de luz que se colocan cercanos al área de captación o, como en las lámparas de uv, para permitir la salida de luz sin ser bloqueada. En algunos casos es deseable que sean de cuarzo.

3.3.3.4. Lentes

Las lentes se utilizan para enfocar el haz de luz sobre el área activa sensible del sensor^[6]. En los tubos fotomultiplicadores que son un tipo de sensor, son una parte integral de la

cápsula del tubo y están directamente enfrente del fotocátodo. En muchos otros tipos de sensores como el empleado en este trabajo se utilizan como selladores transparentes que protegen el material sensor del medio ambiente.

En este trabajo se usó un espejo para recolectar radiación de la fuente de luz y dirigirla a la fisura de entrada del monocromador. Un arreglo efectivo recolector, está basado en un espejo elíptico, el cual se ilustra en la figura (3.11). Cuando la fuente de luz es colocada en un foco del espejo y la ranura de entrada en el otro, la radiación recolectada por el ángulo sólido es enfocada en la ranura.

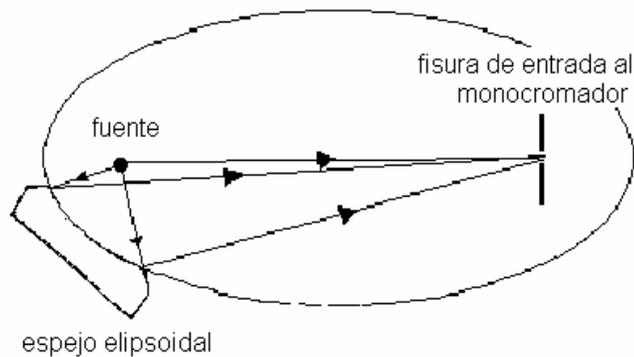


Figura 3.11. Espejo recolector de radiación UV y Visible.

CAPÍTULO 4

CONTROL DE POSICIÓN DE LA REJILLA DE DIFRACCIÓN

En este capítulo se presenta la electrónica empleada para el control de la longitud de onda mediante la rotación del elemento dispersivo en el monocromador, se presenta también la forma en la que se logró este fin mediante el control electrónico de un motor de pasos auxiliándonos de un microcontrolador.

El arreglo mecánico para ajuste de la longitud de onda (λ) es el mostrado en la Figura (4.1). Este arreglo es propiamente parte del monocromador comercial que se tomó para automatizar.

La automatización consiste en ajustar la posición de la rejilla de difracción mediante el control de un motor de pasos, este mueve un tornillo milimétrico que a su vez mueve un plano inclinado que ajusta la posición de la rejilla de difracción a la posición deseada.

El motor de pasos empleado en el diseño, es un motor de inversión de fase y se acopló al mecanismo mediante dos engranes para tener un acoplamiento mecánico adecuado.

Cabe mencionar que es un motor de imán permanente lo cual se tratará más adelante.

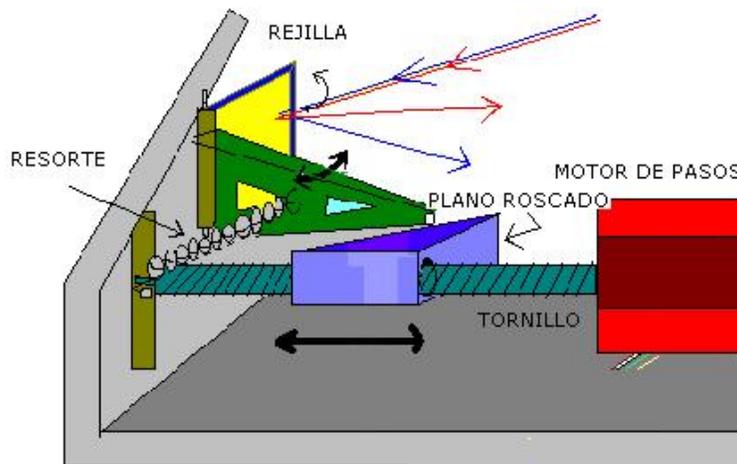


Figura 4.1. Arreglo mecánico para el ajuste de longitud de onda.

4.1. El motor de pasos

Los motores de pasos en ocasiones son empleados cuando se necesita controlar posición de una forma segura sin tener que recurrir a sistemas más complicados.

Como se sabe, su principio de funcionamiento está basado en un estator constituido por varios arrollamientos independientes montados sobre un material ferromagnético. Por otro

lado, cuenta con un rotor que puede girar libremente sobre el estator. Las bobinas (fases) se van energizando una a una, ocasionando con esto un desplazamiento angular del rotor.

4.1.2. Clasificación de los motores de pasos

Podemos clasificar a los motores de pasos de varias formas, pero básicamente y desde el punto de vista de la forma de excitación de sus devanados tenemos:

Motores bipolares.- En estos motores las bobinas del estator se energizan con cierta polaridad en un instante para obtener una determinada posición de equilibrio, un tiempo después se cambia la polaridad de una de ellas para que el rotor nuevamente gire a otra posición por la interacción con la nueva configuración de campos hasta una nueva posición de equilibrio. Este proceso se repite consecutivamente para que el motor gire toda una vuelta. Para lograr esto las bobinas son conectadas en serie formando solamente dos grupos, cada grupo es montado en un estator independiente como se muestra en la figura (4.2). Como se puede observar, se requiere de ocho interruptores que pueden ser mecánicos o electrónicos, la finalidad es que se permita variar la polaridad de la alimentación de las bobinas mediante su activación o desactivación, para diferenciarlos físicamente de los motores unipolares de una manera rápida basta con observar que solo tienen 4 hilos de conexión, esto se puede apreciar en la figura (4.4).

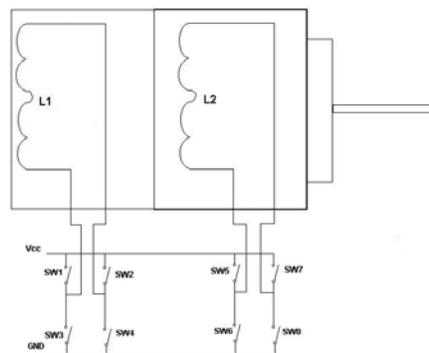


Figura 4.2. Motor bipolar.

Motores unipolares.- En este tipo de motores las bobinas se conectan en serie en cuatro grupos, a su vez, se conectan en pares y se montan en dos estatores independientes, la figura (4.3) muestra la forma en la que pueden ser conectadas las bobinas.

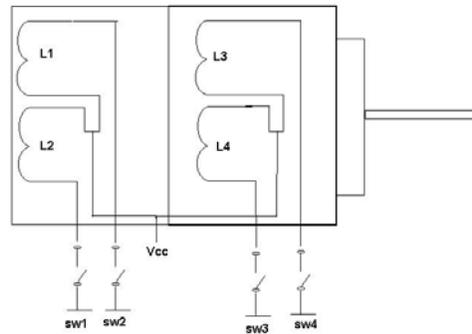


Figura 4.3. Motor unipolar.

Como se puede observar en la figura (4.4) podemos tener motores unipolares de ocho, seis y cinco hilos, también es fácil observar que un motor unipolar de ocho o seis hilos de conexión se puede conectar como un motor bipolar pero no uno de cinco, dado que en este las bobinas están conectadas internamente.

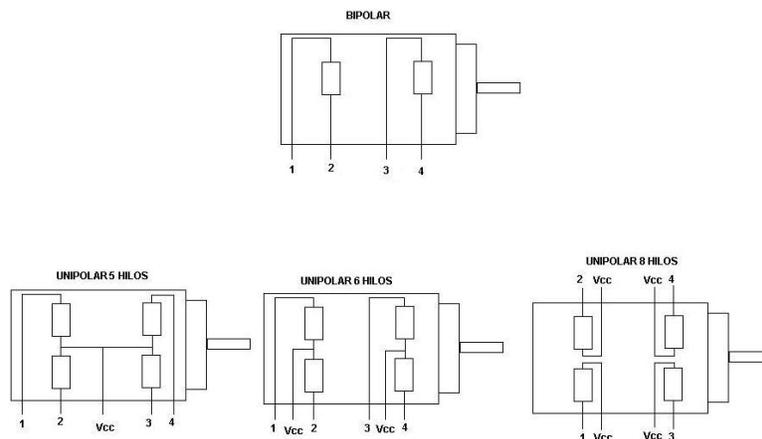


Figura 4.4. Número de hilos de conexión en motores de pasos.

Desde un punto de vista de construcción básicamente existen tres tipos de motores de pasos y son:

De imán permanente.- Funciona por el efecto de interacción entre el campos electromagnéticos generados por las bobinas y un imán permanente alojado en el estator. Sobre este imán se tallan un número de dientes finito de acuerdo al número de pasos que se desean tener por vuelta.

Una de las ventajas, si así se quiere ver y solo para algunas aplicaciones, es que su posición permanece fija aún sin tener excitadas las bobinas.

De reluctancia variable.- Funciona por la interacción del campo electromagnético generado por las bobinas y el rotor, este último se construye a propósito de hierro dulce por lo que presenta un magnetismo remanente. Esto origina que en la condición de estator excitado, el rotor ofrece una menor resistencia a ser atravesado por el flujo magnético en la posición de equilibrio. El tallado o mecanizado del rotor es similar al de imán permanente.

La desventaja de este tipo de motores es que sin excitación, el rotor puede girar libremente, por lo tanto su posición dependerá de su inercia y la de la carga, siendo muy difícil calcular el punto exacto de reposo.

Motores híbridos.- Son la combinación de los dos anteriores y se construyen montando anillos de acero dulce dentado sobre un imán permanente axial.

En general el desplazamiento angular de cada motor dependerá del número de bobinas que lo constituye y estará dado por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{360}{n} \text{-----(4.1)}$$

Donde:

n = número de bobinas

Como esto no es práctico para algunas aplicaciones, dado que se tendrían que aumentar el número de devanados para tener desplazamientos más cortos y por consiguiente aumentar el tamaño de los motores, entonces para diseños en los que se necesitan desplazamientos muy cortos se utilizan los motores de reluctancia variable.

4.1.3. Selección del motor de pasos

Como se mencionó previamente, en los motores de reluctancia variable se pueden conseguir desplazamientos más cortos dado que se construyen con dos, tres o cuatro devanados distribuidos en el estator. El rotor se construye tallando gran número de dientes a lo largo de la superficie del rotor para de esta forma lograr desplazamientos más cortos mediante el aumento del número de polos. Sin embargo, se tiene la desventaja de que su posición final dependerá en gran medida de la inercia y la carga, por lo que su control es más complicado.

Es por esto que, en este diseño se utilizó un motor de imán permanente bipolar, dado que, con el control diseñado únicamente se requiere contar las posiciones por las que pasa el motor al girar los 360°, y como es de imán permanente, estas posiciones están bien definidas. La fineza del movimiento de la rejilla se deja al tornillo milimétrico propio del monocromador.

El motor empleado se alimenta con 10V y es de 20 pasos por vuelta, o sea que en cada paso se desplaza 18°. Esto quiere decir que se necesitan 40 pulsos de reloj para incrementar 10nm dado que el tornillo del monocromador debe girar 36° por cada nanómetro de incremento.

En resumen, para cualquier tipo de motor mencionado es necesario contar con un circuito o mecanismo externo que proporcione la alimentación a los devanados de manera secuencial, de aquí que la alimentación no debe de ser continua sino en forma de pulsos cortos. Esto es logrado con el microcontrolador empleado y mostrado más adelante.

4.1.4. Electrónica para alimentar al motor de pasos

En este diseño se empleó un circuito integrado MC3479 que está diseñado para manejar motores de paso de dos fases bipolar. Este circuito tiene cuatro secciones de entrada, una sección lógica decodificadora de secuencia, dos etapas de salida para manejar las corrientes de las bobinas y una salida que indica la fase en la que se encuentra el motor. En la figura (4.5) se muestra un diagrama a bloques de este integrado.

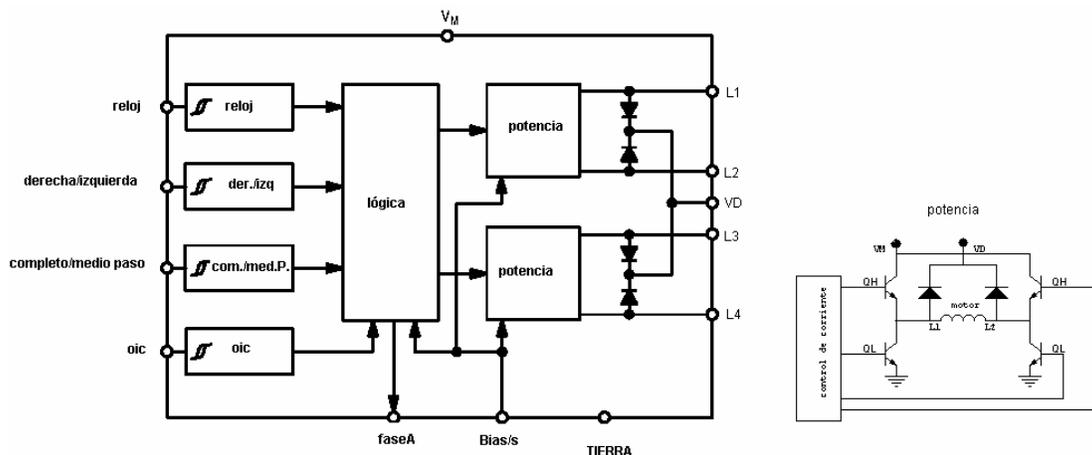


Figura 4.5. Diagrama a bloques del circuito de potencia para el motor de pasos.

Las salidas del integrado (L1, L2 y L3, L4) pueden entregar una corriente máxima de 350mA en cada una de sus dos fases. Estas salidas cambian de estado en la transición de

bajo a alto del reloj, para dar la polaridad correspondiente a los devanados del motor cuenta internamente con un arreglo de transistores en puente “H” por lo que dependiendo de cual transistor este encendido será el sentido de la corriente en las bobinas del motor.

La corriente que los transistores entregan a la salida dependen de la resistencia conectada entre la terminal seis y tierra, por otro lado, cuando se dice que la impedancia a la salida es alta esto quiere decir que los transistores Q_H y Q_L de cada salida están apagados.

La terminal “Bias/set” controla como ya se dijo la corriente máxima de salida, además de cumplir con otras funciones como fijar un estado lógico interno en un valor conocido. Por otra parte también se usa para controlar el consumo de potencia. De una manera más exacta podemos decir que la corriente de salida está determinada por la corriente de base de los transistores “bajos” de potencia (en el puente) de cada salida. Para calcular el valor de la resistencia adecuada se utilizó la ecuación (4.2) proporcionada en las hojas de especificaciones del circuito integrado.

$$R_B = \frac{V_M - 0.7V}{I_{BS}} \text{-----(4.2)}$$

Donde:

I_{BS} = Corriente de bias seleccionado

V_M = Voltaje de polarización de las bobinas que puede estar entre 7.2 y 16.5 V

Para calcular esta corriente se recurre a la gráfica de la figura (4.6). En esta figura podemos ver que para una corriente de salida (I_{OD}) igual a 200 mA se tiene una corriente de bias (I_{BS}) de 95 μA , sustituyendo en la ecuación (4.2) se tiene que:

$$R_B = \frac{10 - 0.7V}{95 \mu A} = 97894.7 \Omega \text{-----(4.3)}$$

Por lo que se eligió una resistencia de valor comercial igual a 100K Ω .

Se tomó un valor de corriente de salida de 200mA para estar dentro del intervalo máximo de corriente de salida y que como ya se dijo es de 300mA.

La conexión empleada se muestra en el diagrama de la figura (4.9) y corresponde a una configuración sugerida en la hoja de especificaciones del fabricante.

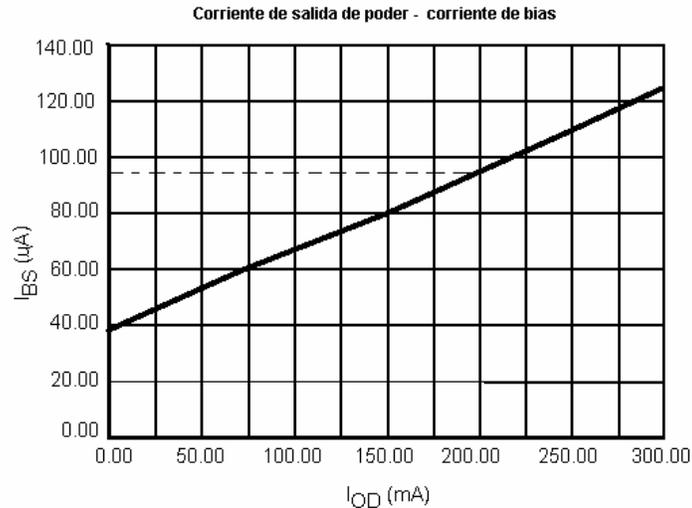


Figura 4.6. Grafica de Salida de corriente contra corriente de bias.

Cuando la terminal COMPLETO/MEDIO PASO se manda a un nivel lógico de “cero” las salidas controlan al motor en la característica de paso completo en cada ciclo de reloj y cuando se manda a un nivel lógico de “uno” las salidas cambian solamente medio paso en cada ciclo y en la dirección indicada por la terminal llamada DERECHA/IZQUIERDA.

La terminal DERECHA/IZQUIERDA permite cambiar el sentido de giro del motor, si es de un valor lógico igual a “1” el giro es a la izquierda y si es de un valor lógico “0” a la derecha.

La terminal OIC solo se utiliza para cuando el circuito está configurado para entregar medios pasos a la salida (controla la impedancia de salida). En este diseño no se empleó la modalidad de medios pasos.

En la salida llamada FASE A solamente se conectó un indicador luminoso para mostrar el estado de las salidas dado que esta salida marca el comienzo de un nuevo ciclo.

4.2. Sistema para la entrada de datos

El sistema utilizado en esta etapa para el control de posición del motor de pasos es de lazo abierto dado que solamente se le indica al motor la posición que se requiere mediante un teclado y este se coloca en esa posición, contando el número de pasos que requiere. Como no se tiene un disco dentado o un sensor que indique que se llegó a la posición, podemos considerarlo de lazo abierto. Por otro lado, para disminuir el error que se pudiera presentar

al no existir realimentación, el sistema se auto-calibra cada vez que se enciende el equipo o se presiona el botón de inicio. Para esto, el motor lleva a la rejilla de difracción a una posición conocida como orden de difracción cero, en la cual el color o longitud de onda que sale por la fisura de salida es el blanco, esto quiere decir que es luz policromática. A partir de esta posición el motor empieza a girar contando desde cero y se posiciona en la cuenta 200 que equivale a 200nm y espera en esta posición hasta que se programe mediante el teclado otra longitud de onda. Como se verá más adelante el sistema cuenta con un selector del tipo de operación, el cual puede ser manual o automático. En el modo automático se opera como se mencionó anteriormente, pero en el modo manual solamente se avanza o retrocede por pasos, esto es, si se quiere aumentar la longitud de onda seleccionada se presiona el botón del teclado “up” y si se quiere disminuir se presiona “down”, en este modo solamente es un paso por evento. Si por otro lado, se manda el equipo al origen para calibrarlo o se enciende el equipo y esta en manual, este se va al origen permaneciendo en esa posición a menos que manualmente se lleve a los 200nm de referencia.

4.3. Electrónica empleada para el teclado

Para el diseño del teclado se utilizó un microcontrolador PIC16F877^[9] y electrónica adicional TTL para el despliegue de datos como se puede apreciar en la figura (4.7).

Como se puede observar en el diagrama, las líneas programadas como entradas en el puerto B (B_0 - B_3) están siempre a un nivel lógico alto y por las líneas de salida, que en este caso corresponden al puerto A (A_0 - A_2) se envía un valor lógico cero en un tiempo por cada salida, de esta manera, si por ejemplo, se envía un cero por A_1 y se presiona una tecla de una fila, esto es, el dígito 4, 5, 6 o 7, entonces se refleja un valor lógico cero en la terminal correspondiente a la tecla presionada. Así que, si tenemos un nivel lógico en B_0 se puede concluir que la tecla presionada fue 4. Para monitorear todas las teclas se rota el cero enviado por las salidas de tal forma que solamente se tenga un cero por fila, esto se hace de manera iterativa, cuando se detecta que una tecla fue presionada se decodifica su valor y se envía al puerto correspondiente del dígito mas significativo permaneciendo en este estado hasta que se presionen tres teclas mas para volver a comenzar. Cuando se presiona la segunda tecla se decodifica y se envía al puerto correspondiente al dígito medio, y cuando se presiona una tercera tecla su valor se envía al puerto del dígito menos significativo. Con

esto se pueden tener valores para el control de la rejilla desde 000 hasta 999 lo cual es suficiente para el control requerido.

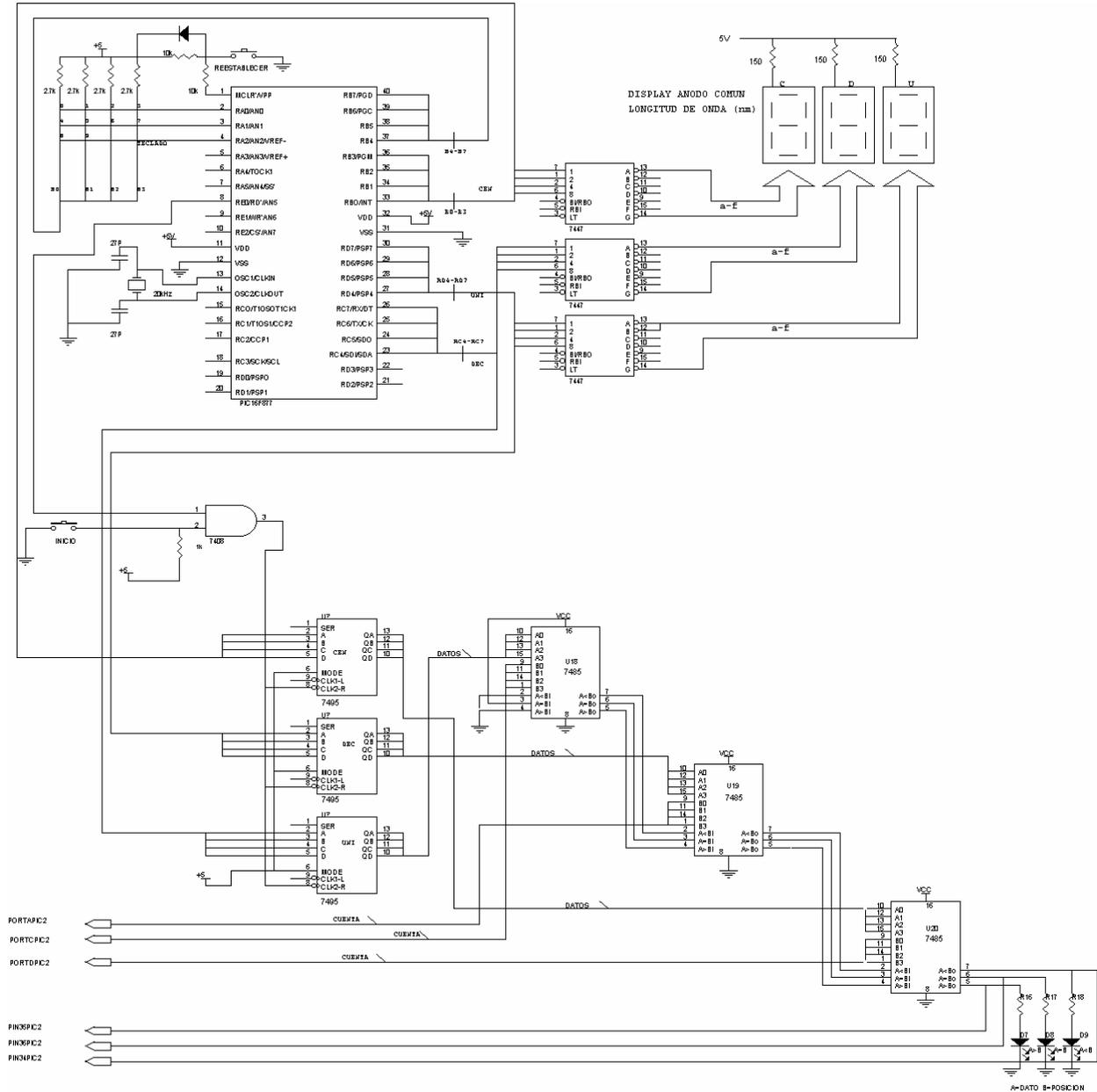


Figura 4.7. Circuito PIC16F877 para el teclado y electrónica adicional para el control.

Para reiniciar el teclado como ya se mencionó, se presiona cualquier tecla que corresponda a un dígito y todos los datos serán cero a la salida, para comenzar nuevamente.

4.3.1. Diagrama de flujo del sistema para entrada de datos

La figura (4.8) muestra el diagrama de flujo del sistema empleado para la introducción de datos, en él se muestra la forma en la que opera el teclado.

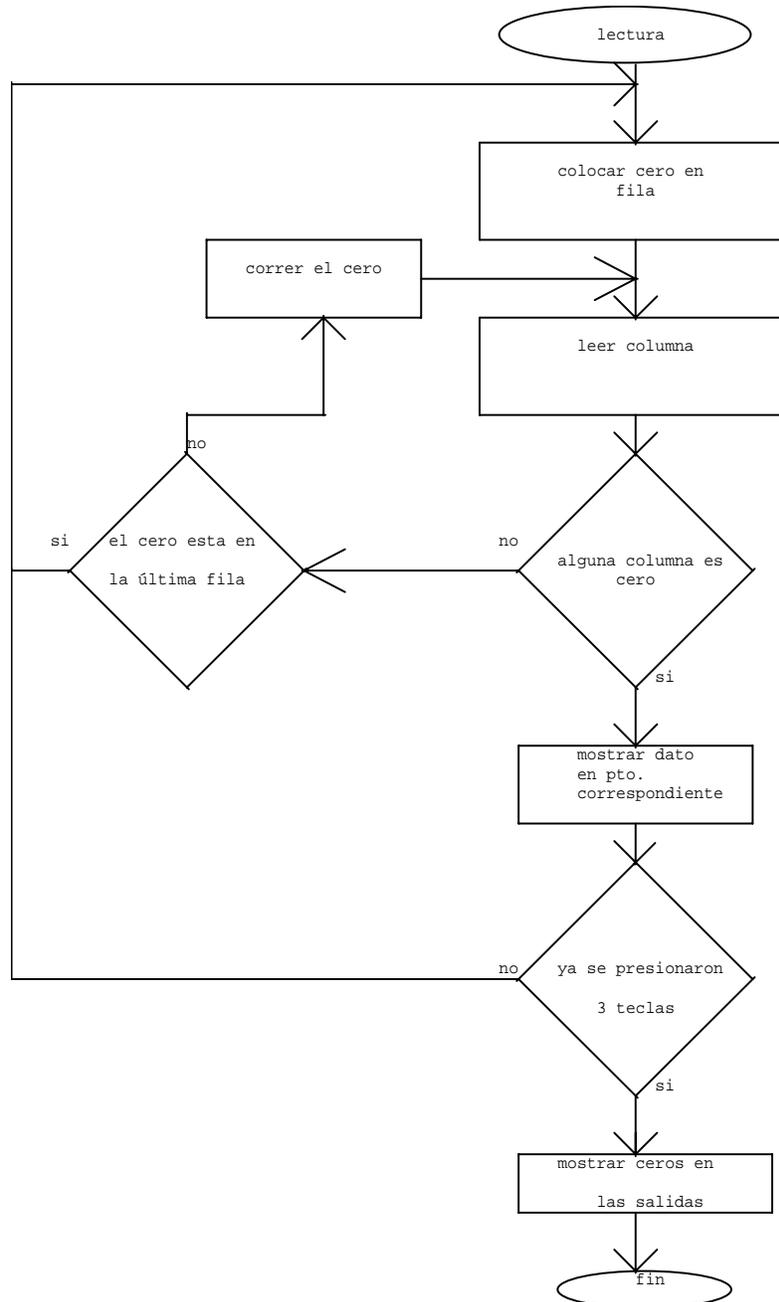


Figura 4.8. Diagrama de flujo del teclado para seleccionar λ .

En el apéndice, se muestra un listado en lenguaje ensamblador del programa para el PIC que se encarga de la entrada de datos para el control de la rejilla de difracción.

4.4. Electrónica empleada para el control de posición de la rejilla

El control de la rejilla de difracción está diseñado con base en un microcontrolador PIC16F877^[9] y electrónica TTL adicional. Para el correcto funcionamiento del sistema se colocaron sensores, tal como se mencionó al principio de este tema, los cuales se pueden observar en la parte inferior del esquema de la figura (4.9). Gracias a estos sensores, cuando el motor llega al origen, envía una señal al microcontrolador para que comience la cuenta y se coloque en 200nm. También se pueden apreciar el selector para el modo manual y automático además de los botones para poder aumentar o disminuir la longitud de onda seleccionada cuando está en modo manual.

Por otro lado, en la figura (4.9) es posible apreciar la forma en la que se conectó la etapa de potencia para el motor y su forma de conexión al PIC. Como se puede apreciar solamente se emplearon tres líneas que corresponden a:

- Ahorro de energía cuando está en la posición seleccionada.
- Giro a un lado, o a otro.
- Reloj de control

También se colocaron indicadores luminosos para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

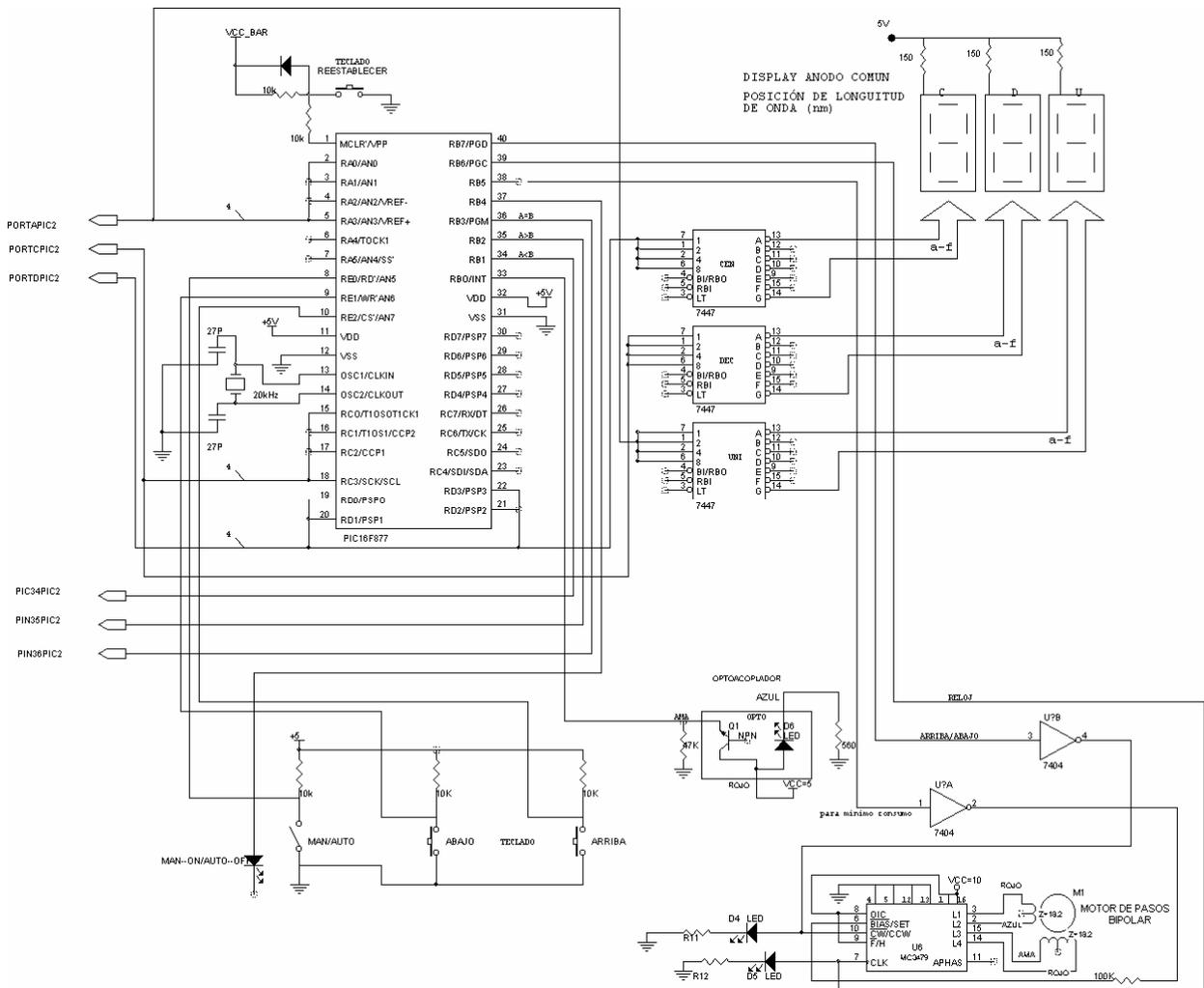


Figura 4.9. Circuito para el control de la rejilla de difracción.

4.4.1. Diagrama de flujo para el control de posición de la rejilla

El diagrama de flujo que muestra la lógica seguida para el diseño del control de la rejilla de difracción se muestra en la figura (4.10), y en el apéndice, se muestra el correspondiente programa en ensamblador para el control de posición de la rejilla de difracción.

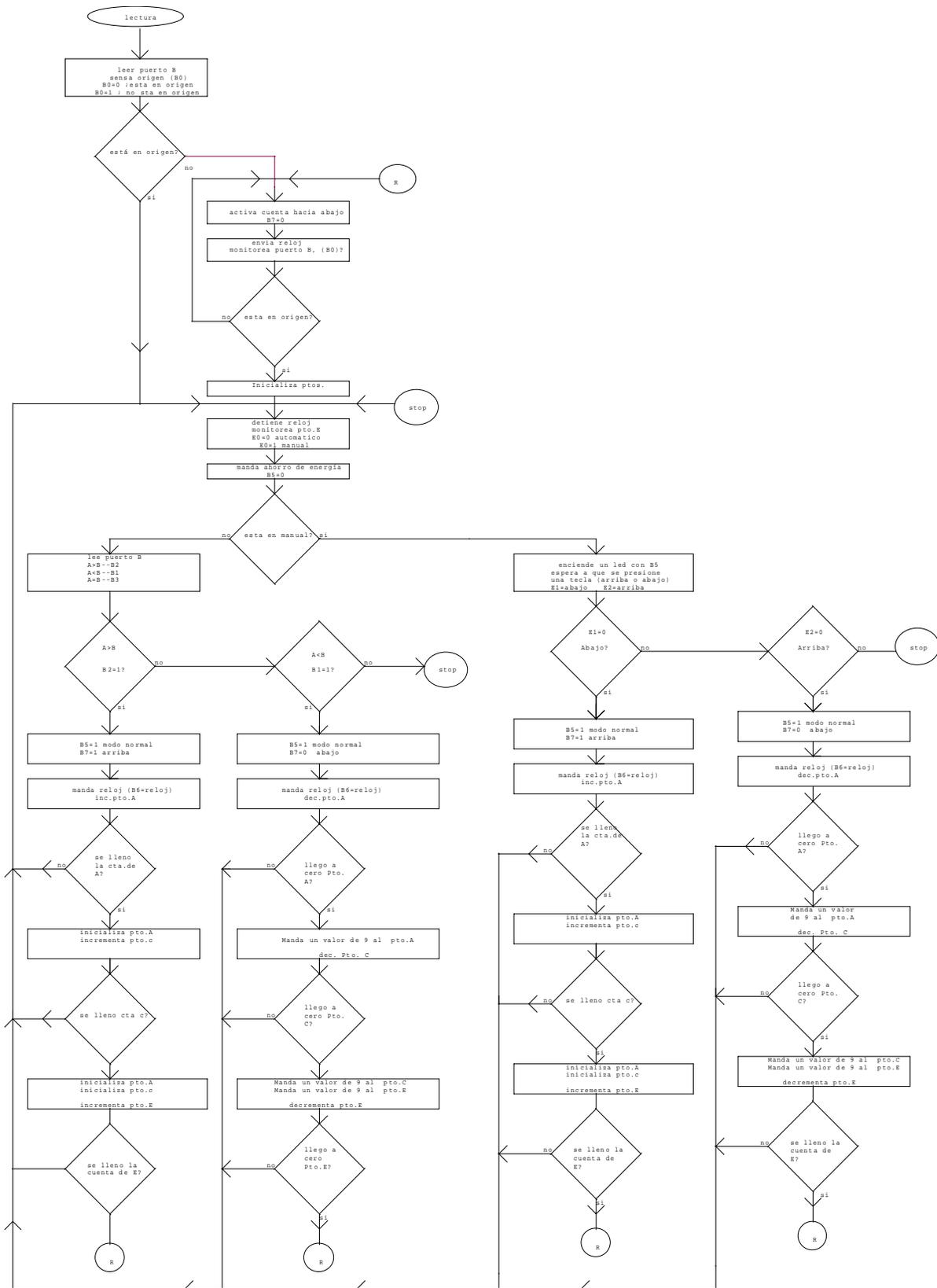


Figura 4.10. Diagrama de flujo del control de posición de la rejilla de difracción.

CAPÍTULO 5

SISTEMA DETECTOR

En este capítulo se presenta el análisis de otro de los bloques que integra el equipo el cual se encarga de captar la luz que logra atravesar la muestra y nos da un indicativo de que tanta energía fue absorbida por ésta.

5.1. Sensor

Los sensores o transductores de luz son aquellos elementos que proporcionan una salida eléctrica utilizable en respuesta a una radiación electromagnética incidente en la porción UV-VIS-IR del espectro. Se conocen también como detectores de luz (específicamente como un detector de UV ó detectores de IR), fotosensores, fotodetectores, fotocélulas, ó transductores de luz (UV ó IR) .

5.2. Clasificación de los sensores de luz

Los sensores de luz se pueden clasificar en dos categorías principales^[1]:

- Detectores cuánticos (fotónicos)
- Detectores térmicos

5.2.1. Detectores fotónicos

Estos dependen de los efectos producidos cuando un cuanto de radiación incidente (fotón) actúa sobre los electrones del material sensor. Los detectores fotónicos a su vez pueden ser fotovoltaicos, fotoconductivos, fotoemisivos o fotoelectromagnéticos.

5.2.1.1. Diferentes tipos de transducción fotónica

Transducción fotovoltaica.- Los sensores fotovoltaicos son autogeneradores, esto quiere decir que no necesitan potencial de excitación exterior. Su voltaje de salida es una función de la iluminación sobre dos materiales diferentes. La unión actúa como una barrera de potencial por la que fluyen electrones excitados por los fotones incidentes.

Algunos tipos de parejas de material que presentan el efecto fotovoltaico podrían ser como las de selenio/hierro (usados como células de selenio relativamente populares) y cobre/óxido de cobre.

Los sensores fotovoltaicos “semiconductores” emplean materiales como el silicio o germanio con los que se fabrican uniones p-n para formar la barrera de potencial. La unión se forma introduciendo diferentes tipos de impurezas en los extremos opuestos de un material semiconductor. Como una variante en un sensor fotovoltaico semiconductor la unión se forma por un cristal tipo n depositado sobre un cristal tipo p.

Existen diferentes tipos de materiales para construir estos sensores, algunos de ellos son:

- ◆ silicio
- ◆ germanio
- ◆ arseniuro de indio
- ◆ antimonio de indio
- ◆ telurio, plomo y estaño
- ◆ telurio, cadmio y mercurio

La Figura (5.1) muestra diferentes encapsulados de sensores de silicio proporcionados por un fabricante. Estos pueden operar como sensores fotovoltaicos o como *sensor fotoconductivos*.

Transducción fotoelectromagnética.- Este método de transducción especializado afecta a un semiconductor (típicamente fabricado de un cristal de antimoniuro de indio) en el que al actuar un campo magnético externo sobre él y cuando los fotones son absorbidos cerca de la superficie total del semiconductor. El exceso de portadores resultantes en esa superficie y su ausencia en la superficie opuesta ocasiona una difusión de portadores hacia la superficie opuesta. La fuerza debida a la aplicación de un campo magnético transversal direcciona los huecos hacia un extremo del semiconductor y a los electrones hacia el otro extremo proporcionando así una diferencia de potencial entre las dos terminales. La ventaja de este método es la reducción del ruido térmico generado internamente.



Figura 5.1. Sensor empleado mostrado en primer plano para el rango UV-VIS.

5.2.2. Los detectores térmicos

Estos responden a la energía radiante incidente total; se utilizan principalmente como sensores de IR. Los detectores térmicos utilizan métodos de transducción termoeléctrica, bolométrica o piroeléctrica.

5.2.2.1 Diferentes tipos de transductores térmicos

Transducción termoeléctrica.- El efecto termoeléctrico (Seebeck) se aprovecha en este tipo de sensores ya sea en forma de termopilas o termopares.

Transducción bolométrica.- Los bolómetros utilizados como sensores de flujo radiante, consisten en un par de termistores apareados (u otros dispositivos resistivos sensibles a la temperatura) conectados en un circuito en medio puente o puente completo, uno de los cuales está ennegrecido y montado de manera que detecta el flujo radiante y responde únicamente a la temperatura del sumidero calorífico.

La figura (5.2) muestra un tipo de sensor térmico.



Figura 5.2. Sensor térmico comercial.

5.3 Selección del sensor

El sensor elegido fue el OPT301, el cual de acuerdo a la clasificación anterior, lo podemos ubicar como un sensor fotovoltaico. Este sensor viene montado en un circuito integrado y está constituido por un fotodiodo y un amplificador de transimpedancia, este último está construido con transistores FET a la entrada. Las resistencias que emplea son de película metálica de precisión, con esto se eliminan problemas de corrientes de error indeseables, ruido y problemas con capacitancias parásitas.

La figura (5.3) muestra la respuesta de diferentes sensores en función de la longitud de onda. El rango espectral del OPT301 corresponde a la curva marcada con el número 4 y corresponde a la respuesta del sensor empleando la resistencia interna de realimentación de

1M Ω . Las unidades marcadas son V/ μ W, pero podría también ser A/W que indicaría la responsividad del fotodiodo.

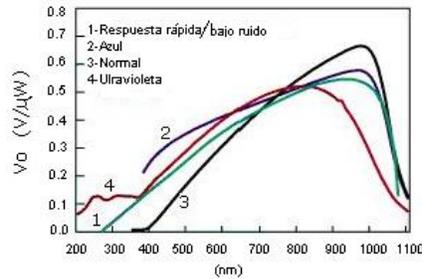


Figura 5.3. Gráfica de responsividad espectral del sensor empleado.

El sensor elegido tiene aplicaciones en las que se tienen niveles bajos de luz y se requiere un amplio rango de respuesta espectral. También se emplea cuando se requiere bajo ruido y gran estabilidad a la variación de temperatura.

5.4. Circuito electrónico de la etapa de sensado

En la figura (6.1) se muestra el circuito completo del sensor con el sistema preamplificador y acondicionador de la señal. La salida de voltaje del OPT301 es el producto de la corriente inversa del diodo (I_D) con la resistencia R_F de realimentación. I_D es proporcional a la potencia radiante en (Watts) que incide en el fotodiodo. Como se puede ver en la figura (5.3), la responsividad a 650 nm es de aproximadamente 0.45 V/ μ W.

Mediante resistencias externas (R_F) seleccionadas con una perilla que puede ser manipulada por el usuario, se pueden elegir diferentes valores de responsividad de voltaje (R_V), el fabricante recomienda colocar ciertos valores de capacitancia en paralelo con algunos valores de R_F elegidos, esto con la finalidad de eliminar picos de ganancia y prevenir inestabilidad, ver tabla (5.1).

Por otro lado la gráfica de la figura (5.4) muestra la respuesta para diferentes valores de energía radiante a 650 nm. Esta curva está basada en el área del fotodiodo que es de $5.23 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, en esta gráfica se puede apreciar como cambia la responsividad de voltaje (R_V) para diferentes valores de R_F .

Los valores de resistencia elegidos son los mostrados en la tabla (5.1). Se tomaron estos valores para tener un rango amplio en la selección de ganancia.

R (EXTERNA)	C(EXTERNO)
33K	180pF
100K	130pF
1M	no necesita
10M	no necesita

Tabla 5.1. Valores de resistencias elegidas para realimentar el sensor.

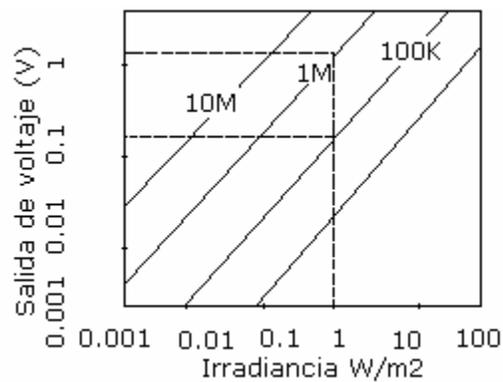


Figura 5.4. Responsividad (R_v) contra irradiancia para diferentes valores de R_F .

La corriente oscura y la corriente de bias de entrada es del orden de 2pA alrededor de los 25°C y se duplica por cada 10°C. Entonces, a los 70°C y considerando una R_F de 10MΩ este error puede ser de aproximadamente 100pA produciendo 1mV de desajuste. Para eliminar este error la señal se inyecta a un amplificador en configuración inversora con control de desajuste de voltaje. Por otra parte, a la entrada de esta etapa se puede ajustar el voltaje que proviene del sensor mediante un potenciómetro para controlar el ajuste del 100% de Transmitancia. La ganancia de este arreglo está dada por la ecuación (5.1) y como V_{ENT} se puede controlar, entonces V_o es variable.

$$\frac{V_o}{V_{ENT}} = -\frac{R_{REAL.}}{R_{ENT}} \text{-----(5.1)}$$

Donde:

$R_{REAL.}$ =Resistencia de realimentación

R_{ENT} = Resistencia de entrada

La ecuación (5.1) corresponde a la ganancia de voltaje que se obtiene en un amplificador operacional cuando se configura como amplificador inversor.

CAPÍTULO 6

ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

En este capítulo se presenta la forma en la que la señal procedente del sensor es procesada para poder tener las correspondientes lecturas de Absorbancia y Transmitancia, así como el análisis del circuito electrónico empleado.

El voltaje que se obtienen a la salida del sensor y que posteriormente es amplificado es proporcional a la luz que detecta el fotodiodo, por lo tanto, nos da una medida de la cantidad de luz transmitida por la muestra. Para poder conocer su correspondiente valor de absorbancia, es necesario procesar esta señal dado que no se puede obtener de manera directa. Debido a lo anterior, se hace necesario obtener el valor logarítmico de la señal de voltaje mencionada, y así poder conocer la absorbancia de la muestra de acuerdo a la ecuación $A = -\log T$. Para lograr esto, primero se intentó con un amplificador logarítmico discreto, construido con amplificadores operacionales y transistores. Al obtenerse resultados poco confiables, dado que las lecturas variaban en gran medida con los cambios de temperatura se optó por utilizar un amplificador logarítmico integrado, el Log 101, el cual es fabricado por Texas.

6.1 El amplificador logarítmico LOG101

El amplificador LOG101 es un circuito que entrega a su salida, una señal que corresponde al logaritmo o relación logarítmica de una corriente en relación a otra corriente de referencia, para esto el circuito integrado internamente hace uso de la relación de voltaje base-emisor de un transistor bipolar.

6.2 Circuito acondicionador de señal

Para acoplar la señal proveniente del sensor con el resto del sistema, se inyecta a un amplificador inversor con una ganancia unitaria, obteniéndose con esto un voltaje positivo a la entrada del circuito LOG101, de esta forma se tendrá la misma polaridad que el voltaje de referencia inyectado en la pata 8 de este circuito integrado, ver figura (6.1).

En esta etapa también se suma al circuito un voltaje para compensar desajustes, y de esta forma calibrar el cero mediante un control externo. Esto es necesario para fijar una referencia en las lecturas de Absorbancia y Transmitancia.

El fabricante recomienda colocar capacitores de $10\mu\text{F}$ cerca de las terminales de alimentación para eliminar problemas de ruido.

El circuito tiene buenos resultados si se manejan corriente de entrada; sin embargo, también se pueden manejar voltajes de entrada colocando resistencias en sus entradas, la única desventaja es que se limita el rango dinámico de entrada.

La función de transferencia de este circuito se muestra en la ecuación (6.1).

$$V_{SAL.} = (1V) \bullet \log \frac{I_1}{I_2} \text{-----(6.1)}$$

Esta ecuación proporcionada en las hojas de especificaciones resulta de analizar la ecuación para el voltaje base-emisor en un transistor bipolar que sirve de realimentación a un amplificador operacional interno. Como se sabe, la temperatura afecta de una forma considerable esta ecuación dado que el término $V_T = \frac{KT}{k}$ que corresponde al voltaje térmico está incluido en esta ecuación. Como se puede ver, la temperatura (T) está muy involucrada, por lo que para compensar sus efectos se utilizan resistencias que tengan un coeficiente de temperatura positivo para fijar un voltaje de referencia. Este hecho es considerado cuando se fabrica el circuito.

La función de transferencia proporcionada en el manual del circuito al trabaja con voltajes se muestra en la ecuación (6.2).

$$V_{SAL.} = k \log \frac{V_{01}}{V_{02}} \text{-----(6.2)}$$

Donde:

V_{01} = Voltaje que proviene del sensor

V_{02} = 1V

puede conectar esta determinado por I_2 máxima e I_1 mínima. Valores grandes de C_C pueden hacer que el LOG101 sea más estable pero reduce la respuesta en frecuencia.

Para aplicaciones especiales el capacitor C_C se elige detectando el nivel de voltaje a la salida y cambiando el capacitor por el más apropiado para obtener los mejores resultados. Como en esta aplicación no se tienen limitaciones de frecuencia, no es crítico el valor que se elija para C_C por lo que se colocó uno de 1000pF que corresponde a la curva en la que I_2 es de 3mA e I_1 es de 10 μ A

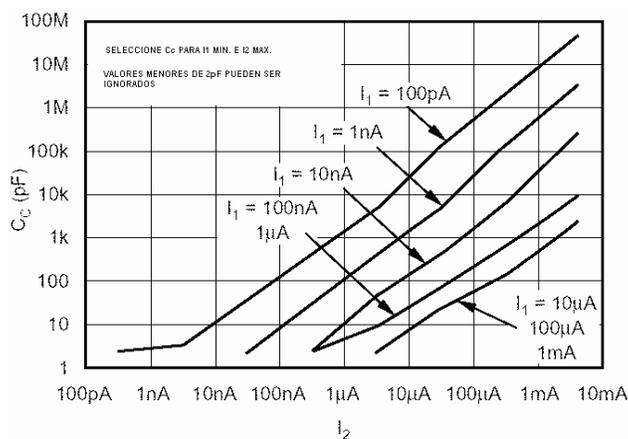


Figura 6.2. Curvas para elegir mínimo valor de C_C proporcionada por el fabricante.

Algunas características importantes del LOG101 son su rango de fuente que va de +/- 4 V a +/-18 V, su rango dinámico de entrada es de aproximadamente 170dB y está entre 100pA a 3.5mA, tiene una baja corriente de reposo de 1mA.

CAPÍTULO 7

PRESENTACION DE DATOS PARA LECTURA

En el presente capítulo se muestra la forma en la que se presentan los datos al usuario. Para lograr este objetivo, se empleó un circuito integrado analógico digital de doble rampa de integración TC7135, el cual está diseñado para proporcionar la salida visual de datos mediante el manejo de 4 dígitos con salidas binarias multiplexadas. Se seleccionó este circuito integrado dado que es económico y fácil de utilizar dado que como se mencionó es capaz de manejar el despliegue de los datos sin tener que emplear otro circuito adicional al convertidor analógico digital, la aplicación, por otro lado, no requiere altas velocidades de conversión ni una gran precisión para poder justificar un convertidor más sofisticado.

7.1. Circuito electrónico de la etapa de lectura

El circuito integrado empleado para esta etapa tiene un “error de cero” menor de $10\mu\text{V}$, su deriva térmica es menor a $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y su corriente de bias de entrada es menor que 10pA .

Un ciclo de medida de este integrado tiene 4 fases que son:

Fase de auto-cero.- Las entradas internas IN^+ e IN^- se desconectan de las terminales externas pero son conectadas internamente al común analógico, el capacitor de referencia (C_{REF}) se carga al voltaje de referencia. Por otra parte el sistema se auto-configura en lazo cerrado en donde el capacitor de auto-cero (C_{AZ}) se carga para compensar el desajuste de voltaje de los amplificadores internos. En este diseño, estos capacitores son de polipropileno debido a su exactitud y su característica de bajas corrientes de fuga.

Fase de Integración de la señal.- En este momento el lazo de auto-cero se abre y las terminales internas IN^+ e IN^- se conectan a las terminales externas, la diferencia de voltaje entre éstas se integra en un periodo de tiempo fijo. Cuando la señal de entrada no sufre ninguna caída con respecto a la fuente de alimentación del convertidor, entonces IN^- puede ser conectada al común analógico para establecer el voltaje correcto de modo común, al término de esta fase la polaridad de la señal de entrada también queda registrada.

Fase de desintegración.- La referencia es usada para llevar a cabo la tarea de desintegración; para esto, la terminal interna IN^- se conecta internamente al común analógico y la terminal IN^+ es conectada a través del capacitor de referencia previamente cargado. La polaridad previamente registrada de la señal de entrada asegura que el

capacitor esté conectado con la polaridad correcta para que la señal de salida del integrador regrese a cero. El tiempo requerido para que el capacitor regrese a cero es proporcional a la amplitud de la señal de entrada y el tiempo de regreso es desplegado como una lectura digital y es determinado por la ecuación (7.3).

$$cuenta\ de\ salida = 10000 \left[\frac{V_{ENT}}{V_{REF}} \right] \text{-----}(7.1)$$

La máxima conversión de escala ocurre cuando V_{ENT} es dos veces V_{REF} .

Fase de Integración a cero.- En esta fase la conexión interna IN- se conecta al común analógico y el sistema se auto-configura en lazo cerrado para provocar que la salida del integrador regrese a cero. Típicamente esta fase requiere de 100 a 200 pulsos de reloj; sin embargo, después de una conversión de sobre-rango se requiere de 6200 pulsos.

En el circuito integrado la terminal destinada para la salida de polaridad es válida para cualquier valor incluso para valores próximos a cero esto es +/- cero.

Cada habilitador de dígito (D_1 a D_5) pasa a un estado alto secuencialmente cada 200 pulsos de reloj. Este proceso es continuo a menos que ocurra un sobre rango. La secuencia de rastreo es D_5, D_4, D_3, D_2, D_1 , posteriormente todos los habilitadores se ponen en blanco al final de la secuencia.

El código binario decimal (B_1, B_2, B_4, B_8) para un determinado dígito se activa secuencialmente en cada una de estas salidas. Simultáneamente, se activa el correspondiente habilitador de dígito en turno.

7.2. Valores de componentes

Par poner en funcionamiento este circuito se tomó una de las aplicaciones sugeridas en las hojas de especificaciones del circuito integrado, no por ello se dejaron de realizar cálculos importantes para la adaptación a esta aplicación en particular. En la figura (7.1) se muestra el diagrama del circuito electrónico que se utilizó en esta etapa del equipo. A continuación se presentan algunos de los cálculos empleados para la selección de algunos componentes críticos.

7.2.1. Resistencia y capacitor de integración (R_{INT} , C_{INT})

El valor de la resistencia de integración (R_{INT}) está determinado por el voltaje de entrada máximo y por la corriente de salida del amplificador integrador. El fabricante indica que éste circuito puede proveer $20\mu A$ sin que se afecte significativamente la linealidad, por lo que, utilizando las ecuaciones que el mismo fabricante proporciona se tiene que:

$$R_{INT} = R_1 = \frac{V_{MAX.}}{I_{INT}} = \frac{2}{20\mu A} = 100K\Omega \text{ -----(7.2)}$$

El cálculo del capacitor de integración se debe seleccionar de tal manera que el producto de éste con la resistencia de integración, proporcione el máximo voltaje sin ocasionar que el amplificador de salida de integración se sature por llegar a los niveles cercanos a las fuentes de alimentación, es recomendable que sea de baja absorción dieléctrica.

Considerando un voltaje de $3.5V$ y aplicando la ecuación (7.3) se tiene el valor para C_{INT} .

$$C_{INT} = C_1 = \frac{10000 \times T_{RELOJ} \times I_{INT}}{V_{MAX}} = \frac{10000 \times 8.3 \times 10^{-6} \times 20\mu A}{3.5} = 0.47\mu F \text{ -----(7.3)}$$

Este valor obtenido es típico para muchas aplicaciones y fue el empleado en este diseño al igual que el valor calculado para R_{INT} calculada.

7.2.2. Capacitor de auto-cero

Los capacitores de valor grande tienden a reducir ruido en el sistema. La absorción dieléctrica en este caso es poco importante. Los valores típicos para este capacitor (C_5) son de $1\mu F$ por lo que se decidió poner uno de este valor.

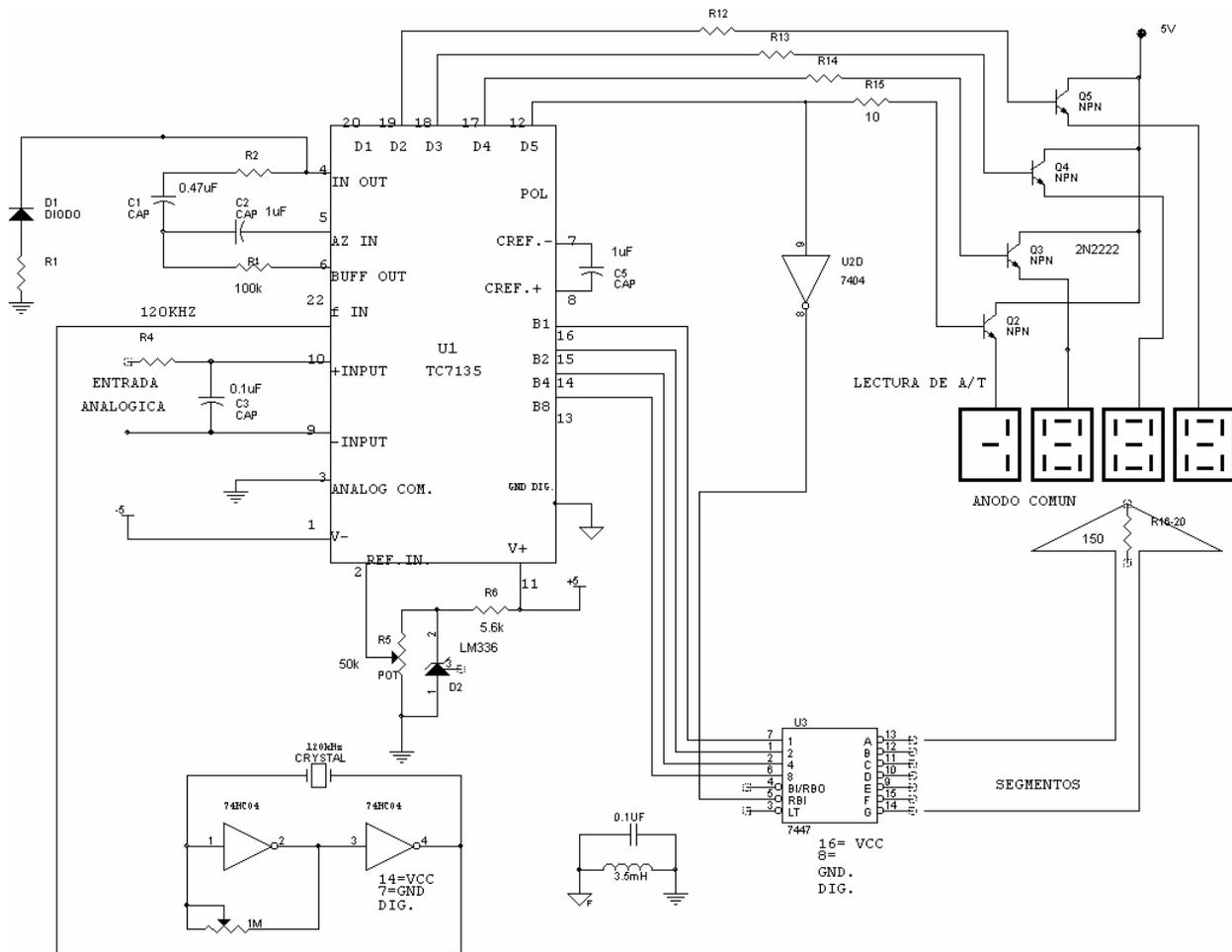


Figura 7.1. Circuito electrónico de lectura de Absorbancia y Transmitancia.

7.2.3. Voltaje de referencia

Para medidas de gran exactitud se debe utilizar una buena referencia. El voltaje de referencia en este caso se ajusto a 1V mediante el uso de un circuito integrado LM336 el cual opera con un bajo coeficiente de temperatura, y puede proporcionar de $400\mu\text{A}$ a 10mA garantizando una buena estabilidad. La figura (7.2) muestra la variación del voltaje zener para una variación de temperatura dada. Como se puede ver, esta variación es muy pequeña en el intervalo en el que normalmente se operaría el equipo, lo cual corresponde a una temperatura entre 10 y $40\text{ }^\circ\text{C}$. Se puede apreciar que prácticamente es una línea recta.

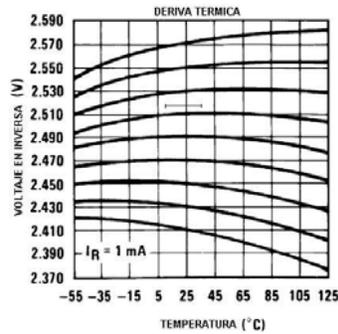


Figura 7.2. Gráfica de deriva térmica para el LM336 proporcionada por el fabricante.

Finalmente, para ajustar el voltaje de 1V se utilizó un potenciómetro como divisor de voltaje.

7.2.4. Resistencia y diodo para corrección de pendiente

Los circuitos integrados ICL7135 tienen un error pequeño en la pendiente de desintegración; sin embargo, este puede ser corregido conectando un diodo rectificador en serie con una resistencia de 100 K Ω , este valor se puede cambiar para corregir en mayor o menor medida este error. Para muchas aplicaciones que no se requiere gran exactitud, no es necesario conectar el arreglo antes mencionado.

7.2.5. Reloj del conversor

Para la mayoría de los conversores Analógico-digitales de doble pendiente, el índice de conversión máximo está limitado por la respuesta en frecuencia del comparador. Por otro lado, las limitaciones de frecuencia mínimas del reloj son impuestas por el capacitor de auto-cero y los capacitores de referencia, de aquí que, si se trabaja con una frecuencia de reloj muy baja se observa un parpadeo en el despliegue de salida.

El fabricante recomienda que para aumentar el rechazo al ruido de 50 y 60 Hz la frecuencia del reloj debe de ser seleccionada para que se integre en un tiempo múltiplo del periodo de estas frecuencias, por lo tanto, para lograr esto se pueden elegir las frecuencias de reloj tales como: 250, 166.66, 125, 100 kHz para cuando se trabaja con 50Hz y las frecuencias de: 300, 200, 150, 120, 100, 40, 33.33 kHz cuando se trabaja con 60Hz.

Finalmente la frecuencia de reloj seleccionada fue la de 120kHz dado que en el mercado se consigue fácilmente el cristal de esta frecuencia, también se observó que no se presentaban parpadeos en la salida de datos con esta frecuencia.

En el diseño del oscilador que generan los 120 kHz, se utilizó una configuración serie-resonante con cristal de cuarzo, esto quiere decir que en el lazo de realimentación no se tienen elementos reactivos (usualmente capacitores), este se puede ver en la figura (7.1).

Cuando se utiliza un circuito resonante serie con cristal, el capacitor de carga que es el que se encuentra en el lazo de realimentación y es externo al cristal, se puede presentar debido a capacitancias parásitas o a las capacitancias en las juntas de los transistores que forman las compuertas del oscilador, no es un factor importante y no es necesario especificarlo. El circuito oscilador depende de la combinación de los componentes reactivos y el cristal para lograr el desplazamiento de fase necesario para comenzar y mantener la oscilación en la frecuencia requerida, en este caso la frecuencia natural de oscilación del cristal.

Con este reloj el ruido de pico a pico es de $15\mu\text{V}$. En el límite, cuando se tiene escala completa el ruido aumenta a $30\mu\text{V}$, lo cual es despreciable para nuestra aplicación. Mucha parte del ruido se origina en la etapa de auto-cero.

7.2.6. Tierra analógica y digital

Para aplicaciones de gran exactitud se debe evitar tener lazos de tierra. Esto quiere decir que, las corrientes de retorno del circuito digital no deben enviarse a la línea de tierra analógica o al contrario. Para acoplar la tierra digital con la analógica se utilizó un filtro LC.

7.3. Consideraciones importantes del circuito

El rango en modo común de la entrada del amplificador es 1V por debajo de la fuente positiva y 1V por arriba de la negativa.

La referencia de voltaje debe de ser positiva con respecto al común analógico.

La exactitud de la conversión depende de la calidad de la fuente de referencia.

En este diseño las terminales “busy, strobe, run/hold, over range under range” no se utilizan, en otras aplicaciones se aprovechan para soportar sistemas basados en microprocesadores.

Los capacitores con grandes tolerancias y gran absorción dieléctrica provocan inexactitud en la conversión, es por esto que como ya se dijo anteriormente se recomienda el uso de capacitores de polipropileno dada su baja absorción dieléctrica. Por otro lado los capacitores de poliestireno y los de policarbonato también responden muy bien.

El circuito ICL7135 está diseñado para trabajar con $\pm 5V$ aunque en algunas aplicaciones puede trabajar con fuente simple. En el circuito diseñado aquí se trabaja con fuente simétrica de $\pm 5V$.

CAPÍTULO 8

PRUEBAS AL EQUIPO TERMINADO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con el equipo completamente terminado. Para esto, se empleó un filtro óptico, también se presentan lecturas realizadas con un equipo comercial Shimadzu UV160U mediante el uso del mismo filtro y se comparan con las obtenidas en este diseño.

8.1. Pruebas eléctricas

Para poder comparar los resultados obtenidos con los de un equipo comercial se cuenta con tablas de equivalencia entre Transmitancia y Absorbancia, además de espectrogramas bien establecidos para los elementos químicos conocidos, que se pueden analizar con esta técnica. También se emplean filtros ópticos para calibración de estos equipos.

La tabla 8.1 muestra los diferentes valores que se obtienen como una relación teórica entre Absorbancia y Transmitancia. En esta tabla se muestran valores de Absorbancia desde cero hasta tres y valores de Transmitancia desde una milésima hasta uno, guardando la relación entre estas dos variables y cumpliendo la ecuación: $A = -\log T = \log 1/T$.

La curva teórica que se obtiene se muestra en la figura (8.1).

T=1	A=0	T=0.754	A=0.123	T=0.508	A=0.294	T=0.381	A=0.419	T=0.258	A=0.588	T=0.135	A=0.87	T=0.012	A=1.921
0.988	0.091	0.702	0.124	0.506	0.292	0.382	0.420	0.253	0.583	0.134	0.874	0.011	1.969
0.986	0.092	0.705	0.125	0.504	0.298	0.38	0.421	0.256	0.592	0.133	0.876	0.01	2
0.984	0.093	0.708	0.126	0.502	0.299	0.379	0.423	0.255	0.594	0.132	0.879	0.009	2.048
0.982	0.093	0.746	0.127	0.5	0.301	0.378	0.424	0.254	0.595	0.131	0.883	0.008	2.097
0.99	0.094	0.744	0.128	0.499	0.302	0.377	0.425	0.253	0.597	0.13	0.886	0.007	2.195
0.988	0.095	0.742	0.131	0.498	0.303	0.376	0.426	0.252	0.598	0.129	0.889	0.006	2.222
0.986	0.096	0.74	0.131	0.497	0.304	0.375	0.427	0.251	0.6	0.128	0.893	0.005	2.301
0.984	0.097	0.738	0.132	0.496	0.305	0.374	0.428	0.25	0.602	0.127	0.896	0.004	2.398
0.982	0.098	0.736	0.133	0.495	0.306	0.373	0.43	0.249	0.604	0.126	0.9	0.003	2.523
0.98	0.099	0.734	0.134	0.494	0.306	0.372	0.431	0.248	0.606	0.125	0.903	0.002	2.699
0.978	0.1	0.732	0.135	0.493	0.307	0.371	0.432	0.247	0.607	0.124	0.907	0.001	3
0.976	0.101	0.73	0.137	0.492	0.308	0.37	0.433	0.246	0.609	0.123	0.91		
0.974	0.101	0.728	0.138	0.491	0.309	0.369	0.434	0.245	0.611	0.122	0.914		
0.972	0.102	0.728	0.139	0.49	0.31	0.368	0.435	0.244	0.613	0.121	0.917		
0.97	0.103	0.724	0.14	0.489	0.311	0.367	0.437	0.243	0.614	0.12	0.921		
0.968	0.104	0.722	0.142	0.488	0.312	0.366	0.438	0.242	0.616	0.119	0.925		
0.966	0.105	0.72	0.143	0.487	0.313	0.365	0.439	0.241	0.618	0.118	0.928		
0.964	0.106	0.718	0.144	0.486	0.313	0.364	0.44	0.24	0.62	0.117	0.932		
0.962	0.107	0.716	0.145	0.485	0.314	0.363	0.441	0.239	0.622	0.116	0.936		
0.96	0.108	0.714	0.146	0.484	0.315	0.362	0.443	0.238	0.623	0.115	0.939		
0.958	0.109	0.712	0.148	0.483	0.316	0.361	0.444	0.237	0.624	0.114	0.943		
0.956	0.11	0.71	0.149	0.482	0.317	0.36	0.445	0.236	0.627	0.113	0.947		
0.954	0.111	0.708	0.15	0.481	0.318	0.359	0.446	0.235	0.629	0.112	0.951		
0.952	0.112	0.706	0.151	0.48	0.319	0.358	0.447	0.234	0.631	0.111	0.955		
0.95	0.112	0.704	0.152	0.479	0.32	0.357	0.448	0.233	0.633	0.11	0.959		
0.948	0.113	0.702	0.154	0.478	0.321	0.356	0.45	0.232	0.635	0.109	0.963		
0.946	0.114	0.7	0.155	0.477	0.322	0.355	0.451	0.231	0.638	0.108	0.967		
0.944	0.115	0.698	0.156	0.476	0.322	0.354	0.452	0.23	0.639	0.107	0.971		
0.942	0.116	0.696	0.157	0.475	0.323	0.353	0.453	0.229	0.64	0.106	0.975		
0.94	0.117	0.694	0.159	0.474	0.324	0.352	0.455	0.228	0.643	0.105	0.979		
0.938	0.118	0.692	0.16	0.473	0.325	0.351	0.456	0.227	0.644	0.104	0.983		
0.936	0.119	0.69	0.161	0.472	0.326	0.35	0.457	0.226	0.646	0.103	0.987		
0.934	0.12	0.688	0.162	0.471	0.327	0.349	0.458	0.225	0.648	0.102	0.991		
0.932	0.121	0.686	0.164	0.47	0.328	0.348	0.459	0.224	0.65	0.101	0.995		
0.93	0.122	0.684	0.165	0.469	0.329	0.347	0.461	0.223	0.652	0.1	1		
0.928	0.123	0.682	0.166	0.468	0.33	0.346	0.462	0.222	0.654	0.099	1.004		
0.926	0.124	0.68	0.168	0.467	0.331	0.345	0.463	0.221	0.656	0.098	1.009		
0.924	0.125	0.678	0.169	0.466	0.332	0.344	0.465	0.22	0.658	0.097	1.013		
0.922	0.126	0.676	0.17	0.465	0.333	0.343	0.466	0.219	0.66	0.096	1.018		
0.92	0.127	0.674	0.171	0.464	0.334	0.342	0.467	0.218	0.662	0.095	1.022		
0.918	0.128	0.672	0.173	0.463	0.334	0.341	0.469	0.217	0.664	0.094	1.027		
0.916	0.129	0.67	0.174	0.462	0.335	0.34	0.47	0.216	0.666	0.093	1.032		
0.914	0.13	0.668	0.175	0.461	0.336	0.339	0.471	0.215	0.668	0.092	1.036		
0.912	0.131	0.666	0.177	0.46	0.337	0.338	0.472	0.214	0.67	0.091	1.041		
0.91	0.132	0.664	0.178	0.459	0.338	0.337	0.474	0.213	0.672	0.09	1.046		
0.908	0.133	0.662	0.179	0.458	0.339	0.336	0.475	0.212	0.674	0.089	1.051		
0.906	0.134	0.66	0.181	0.457	0.34	0.335	0.476	0.211	0.676	0.088	1.056		
0.904	0.135	0.658	0.182	0.456	0.341	0.334	0.478	0.21	0.678	0.087	1.061		
0.902	0.136	0.656	0.183	0.455	0.342	0.333	0.479	0.209	0.68	0.086	1.066		
0.9	0.137	0.654	0.184	0.454	0.343	0.332	0.48	0.208	0.682	0.085	1.071		
0.898	0.138	0.652	0.186	0.453	0.344	0.331	0.482	0.207	0.684	0.084	1.076		
0.896	0.139	0.65	0.187	0.452	0.345	0.33	0.483	0.206	0.686	0.083	1.081		
0.894	0.14	0.648	0.189	0.451	0.346	0.329	0.484	0.205	0.688	0.082	1.086		
0.892	0.141	0.646	0.19	0.45	0.347	0.328	0.486	0.204	0.69	0.081	1.092		
0.89	0.142	0.644	0.191	0.449	0.348	0.327	0.487	0.203	0.693	0.08	1.097		
0.888	0.143	0.642	0.193	0.448	0.349	0.326	0.488	0.202	0.696	0.079	1.102		
0.886	0.144	0.64	0.194	0.447	0.35	0.325	0.49	0.201	0.697	0.078	1.108		
0.884	0.145	0.638	0.195	0.446	0.351	0.324	0.491	0.2	0.699	0.077	1.114		
0.882	0.146	0.636	0.197	0.445	0.352	0.323	0.492	0.199	0.701	0.076	1.119		
0.88	0.147	0.634	0.198	0.444	0.353	0.322	0.494	0.198	0.703	0.075	1.125		
0.878	0.148	0.632	0.199	0.443	0.354	0.321	0.495	0.197	0.706	0.074	1.131		
0.876	0.149	0.63	0.201	0.442	0.355	0.32	0.496	0.196	0.708	0.073	1.137		
0.874	0.15	0.628	0.202	0.441	0.356	0.319	0.498	0.195	0.71	0.072	1.143		
0.872	0.151	0.626	0.203	0.44	0.357	0.318	0.499	0.194	0.712	0.071	1.149		
0.87	0.152	0.624	0.205	0.439	0.358	0.317	0.5	0.193	0.714	0.07	1.155		
0.868	0.153	0.622	0.206	0.438	0.359	0.316	0.502	0.192	0.717	0.069	1.161		
0.866	0.154	0.62	0.208	0.437	0.36	0.315	0.503	0.191	0.719	0.068	1.168		
0.864	0.155	0.618	0.209	0.436	0.361	0.314	0.505	0.19	0.721	0.067	1.174		
0.862	0.156	0.616	0.21	0.435	0.362	0.313	0.506	0.189	0.724	0.066	1.181		
0.86	0.157	0.614	0.212	0.434	0.363	0.312	0.507	0.188	0.726	0.065	1.187		
0.858	0.158	0.612	0.213	0.433	0.364	0.311	0.509	0.187	0.728	0.064	1.194		
0.856	0.159	0.61	0.215	0.432	0.365	0.31	0.51	0.186	0.731	0.063	1.201		
0.854	0.16	0.608	0.216	0.431	0.366	0.309	0.511	0.185	0.733	0.062	1.208		
0.852	0.161	0.606	0.218	0.43	0.367	0.307	0.513	0.184	0.735	0.061	1.215		
0.85	0.162	0.604	0.219	0.429	0.368	0.306	0.514	0.183	0.738	0.06	1.222		
0.848	0.163	0.602	0.22	0.428	0.369	0.305	0.516	0.182	0.74	0.059	1.229		
0.846	0.164	0.6	0.222	0.427	0.37	0.304	0.517	0.181	0.742	0.058	1.237		
0.844	0.165	0.598	0.223	0.426	0.371	0.303	0.519	0.18	0.745	0.057	1.244		
0.842	0.166	0.596	0.225	0.425	0.372	0.302	0.52	0.179	0.747	0.056	1.252		
0.84	0.167	0.594	0.226	0.424	0.373	0.301	0.521	0.178	0.75	0.055	1.26		
0.838	0.168	0.592	0.228	0.423	0.374	0.3	0.523	0.177	0.752	0.054	1.268		
0.836	0.169	0.59	0.229	0.422	0.375	0.299	0.524	0.176	0.755	0.053	1.276		
0.834	0.17	0.588	0.231	0.421	0.376	0.298	0.526	0.175	0.757	0.052	1.284		
0.832	0.171	0.586	0.232	0.42	0.377	0.297	0.527	0.174	0.76	0.051	1.292		
0.83	0.172	0.584	0.234	0.419	0.378	0.296	0.529	0.173	0.762	0.05	1.301		
0.828	0.173	0.582	0.235	0.418	0.379	0.295	0.53	0.172	0.765	0.049	1.31		
0.826	0.174	0.58	0.237	0.417	0.38	0.294	0.532	0.171	0.767	0.048	1.319		
0.824	0.175	0.578	0.238	0.416	0.381	0.293	0.533	0.17	0.77	0.047	1.328		
0.822	0.176	0.576	0.24	0.415	0.382	0.292	0.535	0.169	0.772	0.046	1.337		
0.82	0.177	0.574	0.241	0.414	0.383	0.291	0.536	0.168	0.775	0.045	1.347		
0.818	0.178	0.572	0.243	0.413	0.384	0.29	0.538	0.167	0.777	0.044	1.357		
0.816	0.179	0.57	0.244</										

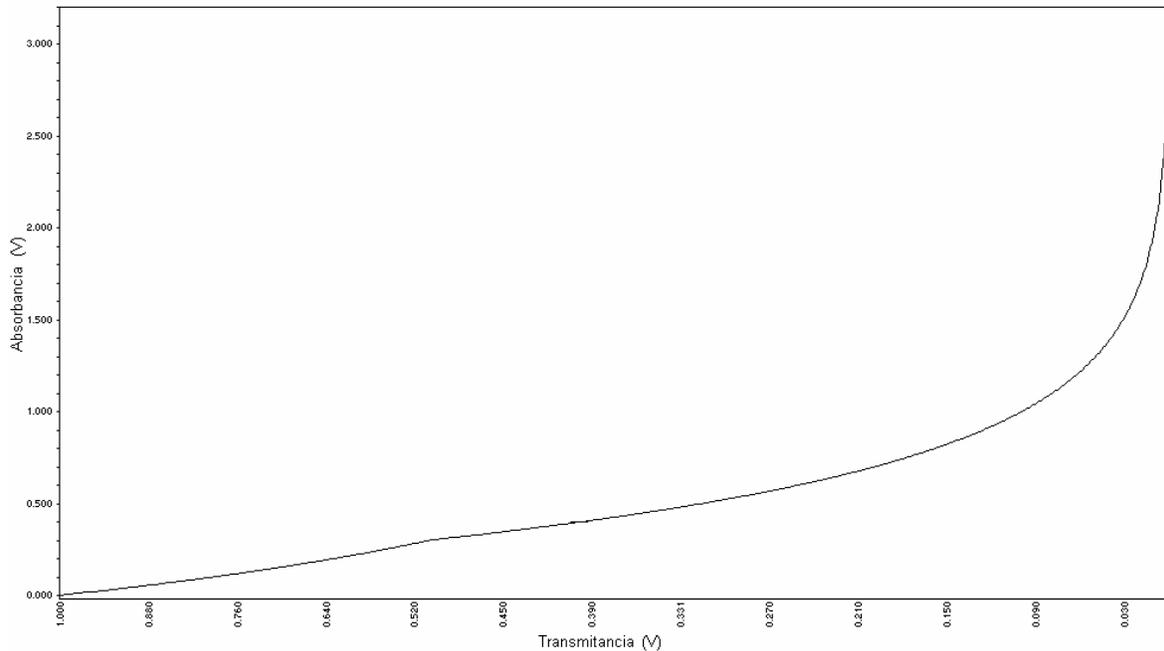


Figura 8.1. Curva que relaciona Absorbancia y Transmitancia.

Si comparamos ambas curvas, sobreponiendo la curva teórica figura (8.1), con la obtenida mediante el equipo diseñado, se puede ver en la figura (8.2) que son muy parecidas teniendo una ligera desviación en los extremos, esto limita un poco nuestro diseño, aunque no es muy grave dado que, cuando se tienen lecturas cercanas a 0 y a 100 por ciento, se debe tener siempre duda de la lectura realizada, incluso en los equipos más sofisticados. Para evitar trabajar en los extremos lo que comúnmente se hace es aumentar o disminuir la concentración de las muestras. Para esto es necesario tener una idea previa de los valores máximos que se pueden obtener al introducir una muestra.

De acuerdo a lo anterior y analizando la gráfica podemos limitar nuestras lecturas de Transmitancia entre 5 y 90 por ciento

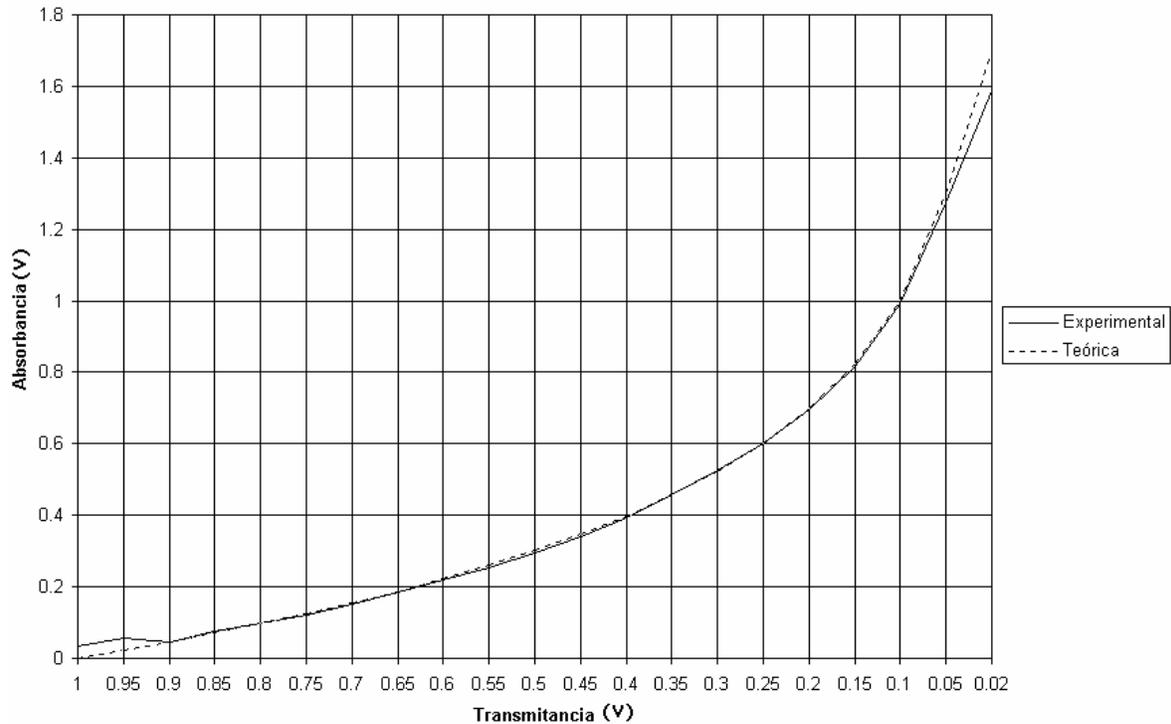


Figura 8.2. Curva logarítmica comparativa teórica y obtenida.

Podemos decir que esta es una prueba eléctrica de todo el sistema, dado que se tomaron medidas de los niveles de voltaje a la salida del amplificador logarítmico para poder obtener esta curva.

8.2. Pruebas ópticas

Finalmente se realizó un barrido en frecuencia, tomando una serie de lecturas con el equipo completamente armado y empleando un filtro a 400nm como muestra, como referencia se empleó el aire. Las lecturas se iniciaron a una longitud de onda de 330nm y se finalizó en 490nm. Se compararon los resultados con las obtenidas mediante un equipo comercial obteniéndose las gráficas mostradas en la figura (8.3).

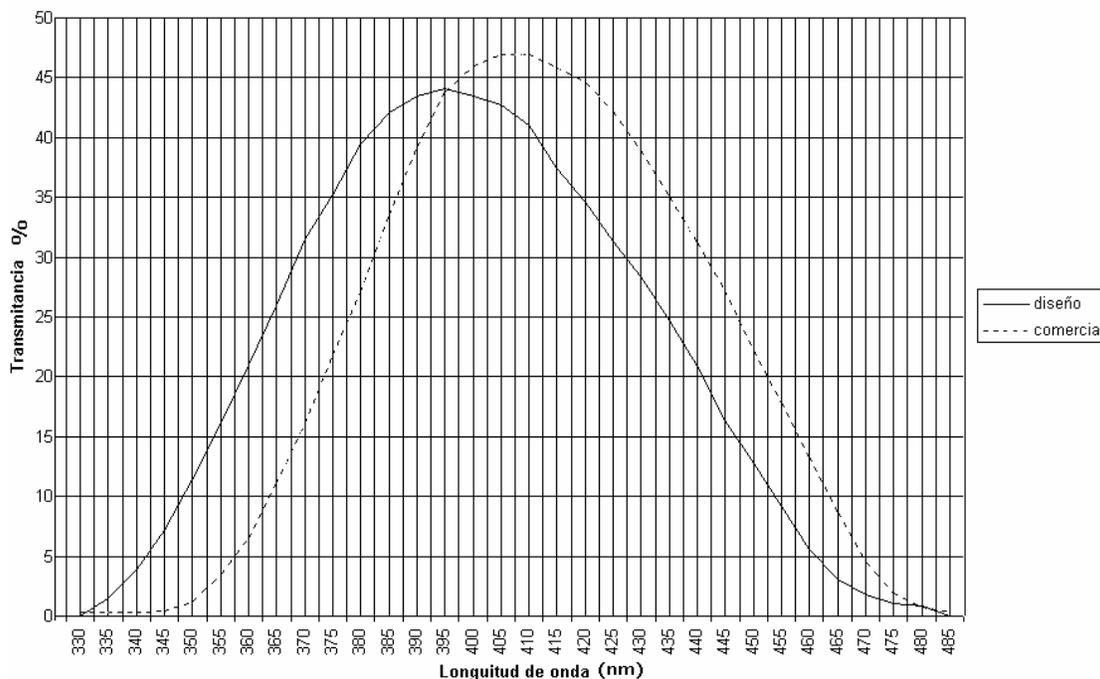


Figura 8.3. Respuesta del equipo diseñado y de uno comercial para un filtro a 400nm.

Como se puede apreciar en las gráficas obtenidas, ambas se encuentran desviadas dado que el máximo de Transmittancia debería estar en 400nm, lo cual tampoco es muy grave dado que esto se puede corregir mediante un ajuste mecánico, Normalmente se recomienda que se verifique la exactitud de longitud de onda una vez por semana en cualquier equipo.

El equipo finalmente terminado se muestra en la figura (8.4). En el, se aprecian las perillas de control e indicadores digitales que corresponden a lecturas de absorbancia, transmittancia, longitud de onda y posición del portamuestras. En el portamuestras se pueden colocar hasta 4 muestras que pueden ser seleccionadas por el usuario.

Resumiendo, podemos mencionar las siguientes características de este diseño:

- Simple haz.
- Rango de longitud de onda 280-750 nm. Ajustable mediante un teclado.
- Monocromador de rejilla con 1200 (líneas/mm).
- Utiliza lámparas Philips de Tungsteno-Halógeno. 6(V)
- Utiliza lámpara Perkin-Elmer de deuterio. 35(W)
- Detector con fotodiodo Burr-Brown de bajo ruido.
- Permite lecturas en Abs. ó % T.

- Tiene perilla de ajuste de cero para blancos.
- Tiene perilla de ajuste de 100% de T.
- Acepta cubetas estándar rectangulares de 10(mm).
- Rango fotométrico (0.046 – 1.3 Abs., 5-90 %T).
- Dimensiones: 408 x 408 x 485 mm. Peso: 8 kgs.
- Trabaja con 127 Volts/60 Hz.



Figura 8.4. Fotografía del espectrofotómetro diseñado.

CONCLUSIONES

El equipo diseñado en el presente trabajo funciona adecuadamente como lo muestra la gráfica obtenida en el último capítulo, esto a pesar de que la mayoría de los ensambles mecánicos fueron contruidos de forma artesanal. Para obtener mejores resultados y aspirar a una comercialización de este diseño, será necesario fabricar las partes mecánicas en una forma más formal y así garantizar el funcionamiento bajo normas de comercialización.

En el prototipo aquí presentado, fue necesario eliminar en lo posible cualquier vibración que pudiera meter ruido al sistema o causar inestabilidad en las lecturas debido a la vibración mecánica de algún elemento óptico, para esto se aseguraron los espejos y las lámparas de tal forma que no se movieran accidentalmente, la parte del monocromador se fijó a la fuente de luz mediante un ensamble mecánico rígido de tal forma que no se tuvieran deformaciones al mover el equipo o por efectos de la temperatura. Por su lado, el detector también se montó de tal forma que su posición no presentara cambios con respecto a todo el sistema óptico.

La temperatura es otro elemento importante que se consideró, dado que la variación de ésta, afecta en gran medida las lecturas. Este hecho se constató cuando se trabajó con el amplificador logarítmico, construido discretamente en la etapa de prueba, originando que se eligiera uno fabricado para ese propósito en específico, puesto que ya viene compensado contra variaciones en temperatura (Log101). Los elementos generadores de calor más críticos son las fuentes de luz, por lo mismo, fue necesario adaptarles un ventilador para que la temperatura no se elevara demasiado en el interior del equipo, ocasionando problemas en la electrónica así como en las mismas lámparas. Por otro lado, se recomienda que el equipo aquí presentado, al igual que los comerciales se deje encendido por cierto tiempo para alcanzar una temperatura estable en todo el sistema y así poder realizar las lecturas de una manera confiable. Es sabido, que si un instrumento de precisión no alcanza su tiempo de calentamiento recomendado, podría ser causa de lecturas imprecisas.

Como se mencionó en las pruebas del equipo, se logró un rango de longitud de onda de 280nm a 750nm, dado que se cuenta con dos lámparas, una Philips de Tungsteno-Halógeno de 6V y otra Perkin-Elmer de deuterio de 35W que cubren esta parte del espectro, con esto se cumplió uno de los objetivos del diseño y que es, cubrir la región ultravioleta y visible

La resolución o paso de banda espectral es un parámetro que depende del monocromador empleado, en este caso es fija, dado que el ancho de las fisuras también lo es. La resolución que proporciona el monocromador es de 5nm, lo cual es útil para analizar la mayoría de las moléculas en solución (fase líquida) ya que presentan bandas de absorción con anchos medios entre 20 y 40 nm, a diferencia de los gases o vapores, los cuales tienen bandas de absorción mucho más estrechas, con esto también se cumplió otro de los objetivos del diseño, dado que se pensó en analizar exclusivamente muestras líquidas

La precisión de longitud de onda se midió empleando un filtro, como el utilizado para obtener la curva de la figura (8.3); se puede apreciar en la figura que se tiene una desviación de +/-5nm. Como anteriormente se mencionó, esto se puede corregir mediante un ajuste mecánico.

Por otro lado, el rango fotométrico del equipo permite lecturas de transmitancia confiables entre (5 y 90 %) y de absorbancia entre (0.046 y 1.3) .Este punto se podría mejorar para lograr un rango mayor, por ejemplo (0 a 100%) de transmitancia. Para esto, sería necesario tener más cuidado en el control del ruido, el cual se puede generar de muchas maneras, tal es el caso de la luz espuria.

El equipo finalmente cuenta con una perilla para el ajuste del cero y otra para el ajuste de 100% de T, además de un control para ajustar la ganancia, características que también se pensaron al inicio de este diseño.

Uno de los puntos de este equipo, que podríamos ver como ventaja sobre muchos de los comerciales que actualmente se emplean en el país, es que la muestra a ser leída se selecciona fácilmente presionando un botón; la mayoría de las veces este sistema es meramente mecánico, seleccionando la muestra mediante el movimiento de una palanca.

Para operar el equipo de manera segura, es recomendable que no se exponga a solventes o lugares muy contaminados, incluso el humo del cigarro ataca la óptica, las lámparas y el sensor. Las fluctuaciones excesivas en la línea de alimentación también causan inestabilidad en las lecturas. Cuando el haz de luz está desalineado debido al movimiento de algún componente óptico se tienen pérdidas de energía y por lo mismo se tiene una pobre funcionalidad, igual pasa si las lámparas están envejecidas, ya que disminuye su emisión; por último, es recomendable que el equipo se coloque en un lugar libre de vibraciones mecánicas para evitar lecturas falsas.

La electrónica utilizada en el control de los motores es de lo último en el mercado, está integrada principalmente por microcontroladores, los cuales requirieron ser programados para su funcionamiento. Estos programas son susceptibles a mejoras dado que, de acuerdo a las necesidades del usuario final, se desearían características específicas del equipo.

Como el espectrofotómetro aquí presentado es de simple haz, es necesario ajustar el cero cada vez que se cambia de escala o se modifica la longitud de onda, pero, dado que este equipo es didáctico, si este proceso fuera hecho automáticamente, pasaría desapercibido por el usuario y no estaría conciente de lo que se está haciendo. Simplemente se limitaría a meter su muestra y obtener su gráfica, cosa que se podría lograr fácilmente con un equipo de doble haz pero con las consecuentes desventajas que esto implica, tales como un costo más elevado y la dificultad de alinear la óptica cada vez que el equipo se desajusta.

Se podría pensar, sin embargo, diseñar un equipo de este tipo, en el que no se tenga la necesidad de ajustar continuamente el cero y el cien por ciento de transmitancia, de esta manera se tendría la facilidad de realizar barridos de la muestra en longitud de onda mucho más rápidos, esto con miras a que el equipo se pudiera emplear incluso en laboratorios y hospitales.

El costo de componentes de este diseño es de alrededor de los 19 000 pesos, considerando incluso el monocromador que sólo se puede adquirir en el extranjero y la lámpara de deuterio que son de los elementos más caros; a esto, habría que agregar el costo del gabinete, la maquila de piezas mecánicas y las horas hombre invertidas en el diseño para poder comparar su costo con el precio de uno comercial.

Dado que es un diseño propio, este equipo podría ser utilizado sin temor a ser dañado por personas inexpertas, tal como alumnos de carreras científicas. Si por alguna causa se llegara a dañar, podría ser reparado a bajo costo, gracias a que se cuenta con toda la información necesaria para esto, cosa que no sucede con equipos extranjeros, ya que las empresas de este tipo cobran por hora-hombre cualquier reparación, además en muchas ocasiones sólo ellos tienen la información necesaria para hacerlo.

APÉNDICE

LISTADO DE PROGRAMAS

4.3.2. Programa en ensamblador para el teclado.

A continuación se muestra el listado del programa diseñado en ensamblador para la implementación del teclado.

```

=====
;Este programa detecta una de 16 teclas conectadas matricialmente pto.A y B
;RA0,RA1,RA2,RA3 son filas como salidas y RB0,RB1,RB2,RB3 son columnas
;que se configuran como entradas, la tecla pulsada se guarda en un registro
;y se saca el valor por RB4,RB5,RB6,RB7 y es mostrado en un display 7 seg.(C.C).
;manejado por un dec.(7440) conectado a la salida del puerto

;-----directivas-----
LIST P=16F877 ;se utiliza el PIC16F877
RADIX HEX ;sistema de numeración hexadecimal
INCLUDE<P16F877.INC> ;para incluir las definiciones
;-----definición de registros-----

RTECLA equ 0x25 ;contiene el valor de la tecla oprimida
RLAZO1 equ 0x26 ;tiempo de retardo (bco.0)
RLAZO2 equ 0x27 ;numero de veces que se repite el retardo (bco.0)
RROTA equ 0x28 ;registro que se rota para enviar unos a las filas
RFILA equ 0x29 ;registro que contiene el no. de filas a probar
RNUMTE equ 0x30 ;registro que contiene el numero de teclas pulsadas

;-----reset-----

reset ORG 0x00 ;el origen esta en 00
goto inicio
ORG 0x05 ;para comenzar el programa en la localidad 05

;-----rutina de retardo-----

bcf STATUS,5
bcf STATUS,6 ;selección del banco (00)

retardo movlw 0x100000 ;es ideal un retardo de 100 a 125 ms.
movwf RLAZO1 ;el registro laso1 se carga con 100

externo movlw 0x100000
movwf RLAZO2 ;el registro laso2 repite el laso1

interno nop
nop
nop
nop
nop
nop
decfsz RLAZO2 ;pregunta si la cuenta regresiva termino
goto interno
decfsz RLAZO1 ;pregunta si el retardo termino
goto externo
retlw 0x0 ;retorno de interrupción y carga w=0

;-----programa principal-----

tabla addwf PCL ;suma W al PC
nop
retlw 0x0 ;primera columna
retlw 0x1 ;segunda columna
nop
retlw 0x2 ;tercera columna
nop

```

```

nop
nop
retlw    0x3           ;cuarta columna

;=====configuración de puertos=====

inicio   bsf    STATUS,5       ;selección del banco (01)
         bcf    STATUS,6

         movlw  0x06           ;dato para cargar el acumulador
         movwf  ADCON1        ;configura todos los pines como entradas digitales

         movlw  0x00           ;dato para utilizar el puerto A como salida
         movwf  TRISA         ;configura todos los pines del puerto como salidas

         movlw  0x0F           ;dato para configurar el puerto B como entradas y sal.
         movwf  TRISB        ;selecciona los pines del puerto como entradas y sal.

         movlw  0x00           ;dato para configurar el puerto c como sal.
         movwf  TRISC        ;selecciona los pines del puerto como entradas y sal.

         movlw  0x00           ;dato para configurar el puerto D como sal.
         movwf  TRISD        ;selecciona los pines del puerto como sal.

inicio2   bcf    STATUS,5       ;selección del banco (00)
         bcf    STATUS,6

         movlw  0x00           ;intercambia 4 bits altos y bajos y los deja en W
         movwf  RTECLA        ;pasa el valor de w al puerto B (display)
         swapf  RTECLA,W
         movwf  PORTC

         movlw  0x00           ;intercambia 4 bits altos y bajos y los deja en W
         movwf  RTECLA        ;pasa el valor de w al puerto B (display)
         swapf  RTECLA,W
         movwf  PORTD

ciclo1    bcf    STATUS,5       ;selección del banco (00)
         bcf    STATUS,6

         movlw  0x0           ;para empezar se muestra un cero en el display.
         movwf  RTECLA
         movlw  0x0           ;para empezar se muestra un cero en el display.
         movwf  RNUMTE

ciclo1b   swapf  RTECLA,W       ;intercambia 4 bits altos y bajos y los deja en W
         movwf  PORTB         ;pasa el valor de w al puerto B (display)
         call   retardo        ;llama al retardo para evitar rebotes
         btfsc  RNUMTE,0      ;salta una línea si el bit 0 del registro rnumte es cero
         goto   ciclo2        ;salta a la rutina para detectar la segunda tecla al pto b

buscar    clrf   RFILA
         movlw  0x0e           ;se prepara para enviar ceros a las filas
         movwf  RROTA

probar    movf   RROTA,W       ;envía el dato a las filas
         movwf  PORTA

leer      nop                ;tiempo para estabilidad de las líneas
         movf   PORTB,W       ;leer las columnas conectadas al puerto B
         andlw  0x0f         ;elimina la parte alta del bit leído
         xorlw  0x0f         ;invierte el dato para ver si hay algún cero
         btfss  STATUS,2     ;pregunta si el resultado es cero(alguna tecla)
         goto   salir
         btfss  RROTA,3      ;pregunta si ya van 4 rotaciones
         goto   buscar       ;si terminó, vuelve a empezar la búsqueda de teclas
         bsf    STATUS,0     ;coloca el bit de carry en 1

```

BIBLIOGRAFÍA**Libros:**

- [1].-B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Fundamentals of photonics, Wiley and Sons, New York, EE.UU., 1991.
- [2].-Charles K. Mann, Thomas J. Vickers, Wilson M. Gulick, Instrumental Analysis, Harper & Row, New York, N.Y., 1974, pp. 429-434, 288, 289.
- [3].-Douglas A. Skoog, F. James Holler, Timothy A. Nieman, Principios de Análisis instrumental, Mc Graw-Hill, Madrid, 2001.
- [4].-E. Hecht , A. Zajac, Óptica, Adison-Wesley Iberoamericana, 1986.
- [5].-Gettys, W Edward, Física clásica y moderna, Mc Graw-Hill, Madrid, 1991.
- [6].-Hobart H. Willard, Lynne L. Merritt, John A. Dean, Frank A. Settle, Instrumental Methods of Analysis, Wadsworth Publishing Company, Belmont Cal., 1988.
- [7].-Howard A. Strobel, William R. Heineman, Chemical Instrumentation: A systematic approach, John Wiley & Sons, USA, 1989, pp. 257-259.
- [8].-John R. Dean, David J. Ando, Atomic Absorption and Plasma Spectroscopy, J.Wiler, University of Greenwich, 1997.

Manuales:

- [1].-Manual de Microcontroladores “ MICROCHIP” PIC 16 F 877x (Data sheet).