

**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN COLORÍMETRO DE  
ALTA SENSIBILIDAD**

**NELSON GUTIERREZ NIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2015**

**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN COLORÍMETRO DE  
ALTA SENSIBILIDAD**

**NELSON GUTIERREZ NIÑO**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Químico**

**Director**

**ENRIQUE MEJÍA OSPINO**

**Químico Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso sincero agradecimiento a:

A Dios infinitamente por brindarme tantas bendiciones en la vida, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente.

A mi familia por estar presentes en las distintas etapas de mi vida, y que han sido un apoyo moral y económico para lograr éste fin. Gracias por su paciencia.

A mi director el profesor Enrique Mejía Ospino, por su dedicación y paciencia para recibir los resultados de este proyecto y por su alta calidad humanista que lo hacen una persona ejemplar.

Al profesor José Carlos Gutiérrez por estar siempre dispuesto a compartir su conocimiento de manera desinteresada y por brindarme las bases para este trabajo.

A todos los profesores y técnicos de la carrera que me enseñaron tanto de la profesión como de la vida, infinitas gracias por toda su dedicación y tiempo.

Y a aquellos compañeros del LEAM, de la carrera y demás personas que con su experiencia, amabilidad y conocimientos hicieron que la práctica experimental fuera agradable y por una u otra razón contribuyeron a que se llevara a cabo mi formación como profesional.

## CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	22
1. MARCO TEÓRICO	26
1.1. ESPECTROSCOPIA	26
1.2. MÉTODOS ESPECTROMÉTRICOS	26
1.2.1. Métodos de emisión, luminiscencia y difusión	26
1.2.2. Métodos de absorción	27
1.2.2.1. Transmitancia	27
1.2.2.2. Absorbancia	28
1.2.2.3. Ley de Beer-Lambert	28
1.3. COLORIMETRÍA	30
1.3.1. Colorímetro	31
1.3.1.1. Fuente de radiación	34
1.3.1.2. Selectores de longitud de onda	36
1.3.1.2.1. Filtros	37
1.3.1.2.2. Monocromadores	39
1.3.1.3 Recipientes para las muestras	41
1.3.1.4. Transductores de radiación	43
1.3.1.4.1 Transductores de fotones	46
1.3.1.5. Procesadores de señales y sistemas de lectura	47

1.4. LÍMITE DE DETECCIÓN (LOD) Y LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN (LOQ)	48
1.5. CIRCUITO ELÉCTRICO	49
1.5.1. Componentes electrónicos	49
1.5.1.1. Componentes activos	49
1.5.1.1.1. Circuito integrado 555	50
1.5.1.2. Componentes pasivos	54
1.5.1.2.1. LED	55
1.5.1.2.2. Fotorresistencia	58
1.5.1.2.3. Condensadores	59
1.5.1.2.4 Resistencia eléctrica	60
2. ESTADO DEL ARTE	62
3. METODOLOGÍA	65
3.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO	65
3.1.1. Caja oscura	66
3.1.2. Fuente de radiación	66
3.1.3. Portamuestra	72
3.1.4. Detectores	74
3.1.5. Sistema de registro	74
3.2. FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO COMPLETO.	79
3.3. FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO	82
3.3.1. Conexión del equipo al computador	82
3.3.2. Encendido y estabilización del colorímetro	83

3.3.3. Ajuste de la celda en el portamuestra	83
3.3.4. Ajuste del Cero Instrumental	84
3.3.5. Incidencia de radiación sobre la muestra	84
3.3.6. Detección de radiación absorbida	85
3.3.7. Digitalización y muestreo del resultado obtenido	85
3.4. PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO	86
3.5. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE REFERENCIA	88
3.5.1. Azul de metileno (luz amarilla $\lambda=591$ nm)	88
3.5.2. Amarillo de titanio (luz azul $\lambda=467$ nm)	92
3.5.3. Verde brillante (luz roja $\lambda=637$ nm)	93
3.5.4. Rodamina B (luz verde $\lambda=529$ nm)	95
3.5.5. Fluoresceína (luz violeta $\lambda=401$ nm)	97
3.6. ANÁLISIS DE DATOS	98
4. RESULTADOS	101
4.1. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA Y LINEALIDAD DEL EQUIPO	101
4.1.1. Azul de metileno (luz amarilla $\lambda=591$ nm)	102
4.1.2. Amarillo de titanio (luz azul $\lambda=467$ nm)	105
4.1.3. Verde brillante (rojo $\lambda=637$ nm)	108
4.1.4. Rodamina B (luz verde $\lambda=529$ nm)	112
4.1.5. Fluoresceína (luz violeta $\lambda=401$ nm)	115
4.2. DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y LINEALIDAD DEL EQUIPO	118
4.2.1. Escala de concentración de 0.05 mg/L	118
4.2.2. Escala de concentración de 0.01 mg/L	120

4.2.3. Escala de concentración de 0.005 mg/L	121
5. CONCLUSIONES	125
6. RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFÍA	127
ANEXOS	127

## LISTA DE FIGURAS

Página

- Figura 1.1.** Atenuación de un haz de radiación mediante una solución absorbente (Skoog et al., 2008). 27
- Figura 1.2.** Componentes de diversos tipos de instrumentos para espectroscopia óptica. En a) se muestra el acomodo para las mediciones de absorción. En b) se ilustra la configuración para las mediciones de fluorescencia. En c) se ilustra la configuración para la espectroscopia de emisión (Skoog et al., 2008). 33
- Figura 1.3. a)** Fuentes y **b)** detectores para los instrumentos espectroscópicos (Skoog et al., 2008). 35
- Figura 1.4.** Salida de un selector característico de longitud de onda (Skoog et al., 2008). 37
- Figura 1.5.** Sección transversal esquemática de un filtro de interferencia (Skoog et al., 2008). 38
- Figura 1.6.** Dos tipos de monocromadores: **a)** monocromador Czerny-Turner de red y **b)** monocromador Bunsen de prisma. (En ambos,  $\lambda_1 > \lambda_2$ ) (Skoog et al., 2008). 40
- Figura 1.7. a)** Materiales de construcción y **b)** selectores de longitud de onda para instrumentos espectroscópicos (Skoog et al., 2008). 42
- Figura 1.8.** Respuesta relativa de varios tipos de transductores fotoelectricos (*A-G*) y transductores termicos (*H, I*): *A*, tubo fotomultiplicador; *B*, fotoconductividad de CdS; *C*, celdas fotovoltaicas de GaAs; *D*, celda de fotoconductividad de CdSe; *E*, celda fotovoltaica de Se/SeO; *F*, fotodiodo de silicio; *G*, fotoconductividad de PbS; *H*, termopar; *I*, celda de Golay (Skoog et al., 2008). 45
- Figura 1.9.** Diagrama encapsulado y apariencia real del C.I. 555 (Semiconductor, 2010). 51
- Figura 1.10.** Diagrama esquemático de la configuración en modo estable del circuito integrado 555. 54

<b>Figura 1.11. a)</b> Representación simbólica y <b>b)</b> apariencia real de un LED (Alexander and Sadiku, 2006).	55
<b>Figura 1.12. a)</b> Representación simbólica y <b>b)</b> apariencia real de un LDR (Donate, 2011).	58
<b>Figura 1.13.</b> Representación simbólica y apariencia real de los condensadores, <b>a)</b> símbolo para condensadores cerámicos, <b>b)</b> símbolo para condensadores electrolíticos y <b>c)</b> diferentes tipos de condensadores presentes en el mercado (Donate, 2011).	60
<b>Figura 1.14. a)</b> Representación simbólica y <b>b)</b> apariencia real de las resistencias eléctricas (Donate, 2011).	61
<b>Figura 3.1.</b> Caja oscura.	66
<b>Figura 3.2.</b> Espectro de emisión del LED violeta.	68
<b>Figura 3.3.</b> Espectro de emisión del LED amarillo	68
<b>Figura 3.4.</b> Espectro de emisión del LED azul	69
<b>Figura 3.5.</b> Espectro de emisión del LED rojo	69
<b>Figura 3.6.</b> Espectro de emisión del LED verde	70
<b>Figura 3.7.</b> Superposición de los espectros de todos los LEDs usados como fuente de radiación en el colorímetro	71
<b>Figura 3.8.</b> Fuente de radiación construida a partir de un arreglo de LEDs y acople de estos al portamuestras.	72
<b>Figura 3.9.</b> Portamuestras construido a partir de un cilindro hueco de PVC.	73
<b>Figura 3.10.</b> Celda empleada en el colorímetro.	73
<b>Figura 3.11.</b> Diagrama electrónico esquemático de la configuración en modo estable del circuito integrado 555.	75
<b>Figura 3.12.</b> Interfaz blindada acústicamente mediante un cilindro PVC	76
<b>Figura 3.13.</b> Software Zelescope 1.05	77
<b>Figura 3.14.</b> Ventana de configuración de resolución y frecuencia de muestreo de programa	78
<b>Figura 3.15.</b> Imagen del prototipo final del colorímetro.	78

<b>Figura 3.16.</b> Circuito electrónico general del colorímetro.	81
<b>Figura 3.17.</b> Tipos de conexiones permitidas por el equipo, a) mediante la tarjeta de sonido interna del computador y b) por medio de puerto USB.	83
<b>Figura 3.18.</b> Ajuste de la celda respecto al colorímetro.	84
<b>Figura 3.19.</b> Fotografía de la cara frontal del colorímetro.	85
<b>Figura 4.1.</b> Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta. de $\lambda=591$ nm.	103
<b>Figura 4.2.</b> Curva de verificación de linealidad de $\lambda=591$ nm mediante regresión lineal empleando soluciones de azul de metileno.	104
<b>Figura 4.3.</b> Curva de concentración vs transmitancia obtenida mediante el espectrofotómetro comercial con $\lambda=591$ nm.	105
<b>Figura 4.4.</b> Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de $\lambda=467$ nm.	107
<b>Figura 4.5.</b> Curva de verificación de linealidad de $\lambda=467$ nm mediante regresión lineal empleando soluciones de amarillo de titanio.	108
<b>Figura 4.6.</b> Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de $\lambda=637$ nm	110
<b>Figura 4.7.</b> Curva de verificación de linealidad de $\lambda=637$ nm mediante regresión lineal empleando soluciones de verde brillante.	111
<b>Figura 4.8.</b> Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de $\lambda=529$ nm	113
<b>Figura 4.9.</b> Curva de verificación de linealidad de $\lambda=529$ nm mediante regresión lineal empleando soluciones de rodamina B.	114
<b>Figura 4.10.</b> Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de $\lambda=401$ nm	116
<b>Figura 4.11.</b> Curva de verificación de linealidad de $\lambda=401$ nm mediante regresión lineal empleando soluciones de fluoresceína.	117
<b>Figura 4.12.</b> Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.	119
<b>Figura 4.13.</b> Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.	119

<b>Figura 4.14.</b> Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.	120
<b>Figura 4.15.</b> Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.	121
<b>Figura 4.16.</b> Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.005 mg/L.	122
<b>Figura A.3.1.</b> Corte inicial de la lámina de aluminio empleada para fabricar la caja negra o cuerpo del equipo.	132
<b>Figura A.3.2.</b> Perforación de orificios, doblez de caras, pestañas y aplicación de pintura negra en la parte interna de la lámina.	133
<b>Figura A.3.3.</b> Caja terminada lista para el ensamble de circuito electrónico y el sistema óptico.	133
<b>Figura A.3.4.</b> Material de partida para la fabricación del portamuestras, constituido por dos tubos de PVC de 1/2 y 3/4". introducido uno dentro del otro.	134
<b>Figura A.3.5.</b> Corte y ajuste del porta muestra a la longitud de la caja.	134
<b>Figura A.3.6.</b> Perforación de orificios y montaje de LEDs y LDRs dentro de los mismos.	135
<b>Figura A.3.7.</b> Configuración de terminales y soldadura de estos segun el diagrama electronico de la <b>Figura 3.16.</b>	135
<b>Figura A.3.8.</b> Fabricación de la interfaz que acopla el circuito con la tarjeta de sonido de la PC, Construido a partir de dos tampones PVC, una fracción de tubo, el microcrofono, parlante y cable blindado.	136
<b>Figura A.3.9.</b> Fabricación del circuito impreso.	136
<b>Figura A.3.10.</b> Vista del circuito impreso luego del tratamiento con cloruro férrico.	137
<b>Figura A.3.11.</b> Componentes electrónicos empleados para la fabricación de la parte electrónica del colorímetro.	138
<b>Figura A.3.12.</b> Montaje de componentes en la placa de circuito impreso.	138
<b>Figura A.3.13.</b> Unificación de todas las partes del circuito electrónico del colorímetro	139

<b>Figura A.3.14.</b> Montaje y ajuste del circuito electrónico y sistema óptico dentro de la caja oscura.	139
<b>Figura A.3.15.</b> Prueba preliminar para la luz amarilla	140
<b>Figura A.3.16.</b> Prueba preliminar para la luz azul.	140
<b>Figura A.1.17.</b> Prueba preliminar para la luz roja.	141
<b>Figura A.3.18.</b> Prueba preliminar para la luz verde.	141
<b>Figura A.3.19.</b> Prueba preliminar de la luz violeta.	142
<b>Figura A.3.20.</b> Diluciones preparadas a partir de la solución concentrada de azul de metileno, se procedió de forma similar para los demás compuestos.	142
<b>Figura A.4.21.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de $\lambda=591$ nm, empleando soluciones de azul de metileno.	143
<b>Figura A.4.22.</b> <i>Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de <math>\lambda=467</math> nm empleando soluciones de amarillo de titanio.</i>	143
<b>Figura A.4.23.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de $\lambda=637$ nm empleando soluciones de verde brillante.	144
<b>Figura A.4.24.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de $\lambda=529$ nm empleando soluciones de rodamina B.	144
<b>Figura A.4.25.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de $\lambda=401$ nm empleando soluciones de fluoresceína.	145
<b>Figura A.4.26.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.	145
<b>Figura A.4.27.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.	146
<b>Figura A.4.28.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.	146
<b>Figura A.4.29.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.	147
<b>Figura A.4.30.</b> Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.005 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.	147

## LISTA DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.1.</b> Carta técnica de colores, voltajes de trabajo, potencia e intensidad, Angulo de visión y material de construcción, de los diferentes LEDs presentes en el mercado (Works, 2014).	56
<b>Tabla 3.1.</b> Parámetros de los LEDs empleados como fuente de radiación monocromática.	67
<b>Tabla 3.2.</b> Características principales de las fotorresistencias empleadas como detectores.	74
<b>Tabla 3.3.</b> Compuestos empleados para la calibración del colorímetro.	87
<b>Tabla 3.4.</b> Asignación de compuestos a cada fuente de luz junto con su respectiva longitud de onda de máxima intensidad.	87
<b>Tabla 3.5.</b> Puntos de concentración para calibración de la luz amarilla.	89
<b>Tabla 3.6.</b> Puntos de concentración del azul de metileno para la determinación de la linealidad de luz amarilla.	90
<b>Tabla 3.7.</b> Exploración inicial de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de 0.05 mg/L.	90
<b>Tabla 3.8.</b> Segunda exploración de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de 0.01.	91
<b>Tabla 3.9.</b> Exploración final de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de 0.005.	91
<b>Tabla 3.10.</b> Puntos de concentración para calibración de la luz azul.	92
<b>Tabla 3.11.</b> Puntos de concentración del azul de metileno para la determinación de la linealidad en la fuente de luz azul.	93
<b>Tabla 3.12.</b> Puntos de concentración para calibración de la luz roja.	94
<b>Tabla 3.13.</b> Puntos de concentración del verde brillante para la determinación de la linealidad del sistema de luz roja.	95

<b>Tabla 3.14.</b> Puntos de concentración para calibración de la luz verde.	95
<b>Tabla 3.15.</b> Puntos de concentración de la rodamina B para la determinación de la linealidad en la luz verde.	96
<b>Tabla 3.16.</b> Puntos de concentración para calibración de luz violeta.	97
<b>Tabla 3.17.</b> Puntos de concentración de la fluoresceína para la determinación de la linealidad en el color violeta.	98
<b>Tabla 4.1.</b> Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones del azul de metileno, utilizando la fuente de luz amarilla.	102
<b>Tabla 4.2.</b> Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en $\lambda=591$ nm.	103
<b>Tabla 4.3.</b> Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones del amarillo de titanio, utilizando la fuente de luz azul.	105
<b>Tabla 4.4.</b> Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en $\lambda=467$ nm	107
<b>Tabla 4.5.</b> Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones del verde brillante, utilizando la fuente de luz roja.	108
<b>Tabla 4.6.</b> Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en $\lambda=637$ nm.	110
<b>Tabla 4.7.</b> Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones de la rodamina B, utilizando la fuente de luz verde.	112
<b>Tabla 4.8.</b> Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en $\lambda=529$ nm	113
<b>Tabla 4.9.</b> Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones de la fluoresceína, utilizando la fuente de luz violeta.	115
<b>Tabla 4.10.</b> Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en $\lambda=401$ nm.	116
<b>Tabla 4.11.</b> Resultados de la verificación de la linealidad del equipo.	117
<b>Tabla 4.12.</b> Valores de porcentaje de transmitancia y absorbancia obtenidos tras la exploración inicial de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de concentración de 0.05 mg/L.	118

**Tabla 4.13.** Valores de porcentaje de transmitancia y absorbancia obtenidos en la segunda exploración de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de concentración de 0.01 mg/L. 120

**Tabla 4.14.** Valores de porcentaje de transmitancia y absorbancia obtenidos tras la tercera y última exploración de la sensibilidad del equipo, empleando intervalos de concentración de 0.005 mg/L. 121

**Tabla 4.15.** Parámetros analíticos de la curva de calibración obtenida para la determinación de la sensibilidad. 122

**Tabla 4.16.** Comparación entre los resultados de la sensibilidad y linealidad de los equipos. 123

## LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo A. Diseño del prototipo del instrumento	132
Anexo B. Puesta en marcha del equipo	140
Anexo C. Preparación de soluciones de referencia	142
Anexo D. Calibración	143
Anexo E. Determinación de la sensibilidad y linealidad	145

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

C.I.	Circuito integrado
c.a	Corriente alterna
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
c.d	Corriente directa o continua
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada)
$k_d$	Corriente residual
LDR	Siglas en ingles light-dependent resistor, resistor dependiente de la luz
LED	acrónimo inglés, light-emitting diode: diodo emisor de luz
LOD	Límite de detección
LOQ	Límite de cuantificación
PN	Unión de la estructura fundamental de los componentes semiconductores electrónicos
RC	Circuito electrónico conformado por una resistencia y un condensador
V <sub>cc</sub>	Voltaje de corriente continua
$P_0$	Medida de la luz en el fenómeno de absorción antes de que esta pase a través del analito
$P$	Medida de la luz en el fenómeno de absorción después de que esta pase a través del analito
$S$	Señal eléctrica emitida por los traductores, generalmente medida de voltaje o corriente eléctrica
$T$	Transmitancia
UV	Luz ultravioleta
$k$	Sensibilidad de calibración
$\Omega$	Ohmio
$\epsilon$	Absortividad molar

**TITULO:** Construcción y puesta en marcha de un colorímetro de alta sensibilidad\*

**AUTOR:** Nelson Gutierrez Niño\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Colorímetro, sensibilidad, LED, tarjeta de sonido, portable, USB.

### **CONTENIDO**

El prototipo del colorímetro diseñado está basado en las técnicas espectroscopias. Este trabajo propone una nueva alternativa de la construcción y puesta en marcha de un colorímetro de alta sensibilidad. Se seleccionó una metodología para el desarrollo de un equipo sensible a partir de componentes electrónicos simples y económicos. Empleándose LEDs como fuentes de radiación monocromática puntual. Los detectores son LDRs y el sistema de registro está compuesto por un circuito integrado (555) enlazado a una tarjeta de sonido mediante un interfaz con tecnología plug and play, permitiéndose así una conectividad instantánea con cualquier computador que cuente con puerto USB. El instrumento propuesto fue calibrado mediante la preparación de soluciones de referencia con concentraciones entre 0.005 y 10 mg/L.

Se logró construir un equipo de calidad con características destacables como alta sensibilidad, linealidad, portabilidad y robustez sin recurrir a un diseño complejo y con alto costo. Además de su facilidad para conectarse con cualquier computador a través de su puerto USB, consolidándose como un equipo portable, posibilitando su aplicación bajo condiciones de movimiento debido a que su sistema óptico se unificó en una sola pieza, lo que a su vez potencio su robustez. Este diseño se presenta como una alternativa de fácil uso y cómoda manipulación.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Director: Enrique Mejía-Ospino

**TITLE:** Construction and production of a highly sensitive colorimeter\*

**AUTHOR:** Nelson Gutierrez Niño\*\*

**KEYWORDS:** Colorimeter, sensitivity, LED, sound card, portable, USB.

### **ABSTRACT**

The prototype of the colorimeter design is based on spectroscopic techniques. This paper proposes a new alternative for the construction and production of a highly sensitive colorimeter. A methodology for the development of sensitive equipment from simple and inexpensive electronic components was selected. We used LEDs as sources of punctual monochromatic radiation. The detectors are LDRs and the registration system consists of an integrated circuit (555) which it is linked to a sound card throughout interface with plug and play technology, so allowing himself a Instantaneous connectivity to any computer that has USB port. The proposed instrument was calibrated by preparing reference solutions with concentrations ranges between 0.005 and 10 mg / L.

It was possible to build an equipment with outstanding quality and remarkable characteristics such as high sensitivity, linearity, ruggedness, and ease portability without resorting to a complex design with a high cost. It is also easy to connect to any computer through its USB port, consolidated as a portable equipment. This allows its use and application under conditions of movement due to its optical system, which it was unified in one piece and at the same time optimizes its robustness. This design is presented as an alternative of ease and comfortable handling.

---

\*Undergraduate Thesis

\*\* Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Thesis Advisor: Enrique Mejía-Ospino

## INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, científicos y filósofos han especulado sobre la naturaleza de la luz. El estudio y la comprensión moderna de la luz comenzó con el experimento del prisma de Isaac Newton, con el que comprobó que cualquier haz incidente de luz blanca, no necesariamente procedente del Sol, se descompone en el espectro del arco iris (del rojo al violeta). Newton tuvo que esforzarse en demostrar que los colores no eran introducidos por el prisma, sino que realmente eran los constituyentes de la luz blanca. Posteriormente, se pudo comprobar que cada color correspondía a un único intervalo de frecuencias o longitudes de onda (Granés and Cárdenas, 2005).

A partir de esta idea desarrollada por Newton, Joseph von Fraunhofer, astrónomo y físico, construyó el primer espectroscopio para descubrir que el espectro de la luz solar estaba dividido por una serie de líneas oscuras. Por el contrario, la luz generada en laboratorio mediante el calentamiento de gases, metales y sales mostraba una serie de líneas estrechas, coloreadas y brillantes sobre un fondo oscuro. La longitud de onda de cada una de estas bandas única para cada elemento que había sido calentado. De esta forma surgió la idea de utilizar estos espectros como huella digital de los elementos observados (Malacara, 2002). A partir de ese momento la espectroscopia comenzó a desarrollarse como una disciplina científica hasta el día de hoy.

En la actualidad las ciencias analíticas están constituidas en su gran mayoría por técnicas instrumentales espectroscópicas, que permiten realizar estudios con muy buenos parámetros de calidad, los cuales están reflejados en la exactitud, sensibilidad, robustez, fiabilidad, entre otros (Koel and Kaljurand, 2006, Fichet *et al.*, 2001). Estas técnicas permiten identificar y cuantificar compuestos presentando un sin número de aplicaciones en diversas áreas del conocimiento como la astronomía

(Serrano, 2002), la física (Acevedo and Poblete, Nov de 2001) y la química (Calderone *et al.*, 2007, Aya-Ramírez *et al.*, 2002), entre otras.

Evidentemente, cada campo de estudio en la espectroscopia está enfocado a diferentes tipos de análisis específicos, como es el caso de la espectroscopia ultravioleta-visible, que es empleada para determinar algunos grupos funcionales de moléculas y principalmente para cualificar y cuantificar el contenido de alguna sustancia presente en una solución (Vargas and Eugenia, 2003). Pero la mayoría de estas técnicas espectroscópicas de absorción molecular resultan en altos costos, por los reactivos involucrados en el proceso y la metodología que se debe seguir lo cual está directamente relacionado con el equipamiento empleado.

Por tanto el desarrollo de instrumentos de medición fundamentados en el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia no se ha hecho esperar. Hoy día se cuenta con una gran variedad de equipos especializados en cada región del espectro electromagnético, siendo los espectrofotómetros UV vis y los colorímetros o fotómetros, los encargados de la región visible, en la que está fundamentada la espectroscopia de absorción molecular.

Debido al gran desarrollo de técnicas en la espectroscopia y la creciente demanda de instrumentos de medición para esta, en la actualidad se busca mejorar los instrumentos construidos para este fin, diseñándose equipos cada vez más potentes y sensibles sustentados en la tecnología electrónica actual, ya que finalmente la ciencia va de la mano con el desarrollo tecnológico. Del mismo modo, se han enfocado en la reducción del tamaño de la configuración del equipo facilitando de esta forma las posibilidades de ser empleado como equipo portátil para análisis *in situ* (Koel and Kaljurand, 2006).

Estos equipos representan una herramienta sencilla y relativamente barata para realizar análisis por absorción. Además, presentan un elevado rendimiento

energético por tanto una buena relación señal/ruido estando contruidos con detectores y circuitos relativamente sencillos, la cual es una característica buscada a la hora de realizar un análisis con un equipo instrumental. Cuando el método no requiere una alta pureza espectral (lo que generalmente sucede) los análisis cuantitativos se pueden realizar con la misma exactitud con un fotómetro que con un instrumento complejo y más costoso (Skoog *et al.*, 2008).

Atendiendo a las ventajas anteriormente mencionadas y debido a la gran aplicación que tiene la espectroscopia visible en la actualidad se han desarrollado nuevos modelos de fotómetros, para esta región del espectro electromagnético, simplificados con aplicaciones específicas, como es el caso de Jambunathan *et al.* 1999 (Jambunathan *et al.*, 1999), quienes realizaron un acople entre un LED, una fibra de vidrio y un detector comercial de absorbancia, con el fin de construir un modelo simple de un fotómetro y estudiar sus ventajas, desventajas y posible aplicación, obteniendo buenos resultados en cuanto a la linealidad y estabilidad del sistema montado.

Posteriormente, Fonseca *et al.* 2004 (Fonseca and Raimundo Jr, 2004), desarrollaron un modelo de un fotómetro multicanal basado en LEDs empleando calibración multivariante, argumentando la simplicidad del equipo, el bajo porcentaje de error en diversos análisis realizados, además de las ventajas de los LEDs sobre otros tipos de fuente de luz típicamente empleadas. Por otro lado, De Lima. 2008 (de Lima, 2012), desarrolló un modelo simple de este para determinar hidrocarburos aromáticos presentes en agua, obteniendo buenos resultados y mostrando la posibilidad de desarrollar equipos para este campo de la ciencia, económicos y que generen resultados con error aceptable.

De forma análoga Gaião *et al.* 2008 (Gaião *et al.*, 2008), construyeron un fotómetro infrarrojo para el análisis e identificación de gasolinas adulteradas, obteniendo resultados favorables y evidenciando que no es necesario tener un equipo

sofisticado para análisis de este tipo. En este mismo año, Hernandez. 2008 (Hernandez, 2008), realizó un trabajo similar, construyendo un circuito para un fotómetro, empleando componentes electrónicos simples, obteniendo una respuesta lineal y una alta sensibilidad en el equipo desarrollado.

Como se destacó anteriormente, la literatura muestra que las investigaciones enfocadas en el diseño y construcción de un fotómetro, han buscado arduamente a través del tiempo la elaboración de equipos que logren alcanzar el mayor desempeño técnico y superen las limitaciones causadas por su sensibilidad y portabilidad. Por lo que, la relativa sencillez del prototipo final del colorímetro diseñado en este estudio expone la posibilidad de adaptarlo como herramienta de trabajo en campo para análisis elemental *in situ* de compuestos en solución acuosa, para determinar sus concentraciones con un porcentaje de error aceptable, similar al de los dispositivos comerciales ya existentes.

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1. ESPECTROSCOPIA**

La espectroscopia está definida como el estudio de la interacción de varios tipos de radiación con la materia. Desde siempre el interés se ha enfocado en las interacciones entre la radiación electromagnética y la materia, desarrollándose así lo que se conoce como métodos espectrométricos, los cuales se definen como un grupo de métodos analíticos que se basan en la espectroscopia atómica y molecular (Skoog *et al.*, 2008).

### **1.2. MÉTODOS ESPECTROMÉTRICOS**

Los métodos espectrométricos más utilizados son los que están fundamentados en la radiación electromagnética, que es un tipo de energía que se manifiesta de diferentes formas; las más reconocidas son la luz y el calor radiante, las menos obvias son los rayos gamma, rayos X y también están la radiación de microondas y la radiofrecuencia (Skoog *et al.*, 1997). Todas estas clasificaciones de la radiación electromagnética en si pertenecen a un mismo fenómeno, la única diferencia está en la energía que transmiten (Pickering, 1980).

#### **1.2.1. Métodos de emisión, luminiscencia y difusión**

Entre las principales clases de métodos espectroquímicos está; la emisión, la luminiscencia, la difusión y las absorción. Para los tres primeros métodos, la potencia de la radiación que emite un analito después de la excitación es directamente proporcional a la concentración del analito (Skoog *et al.*, 2008).

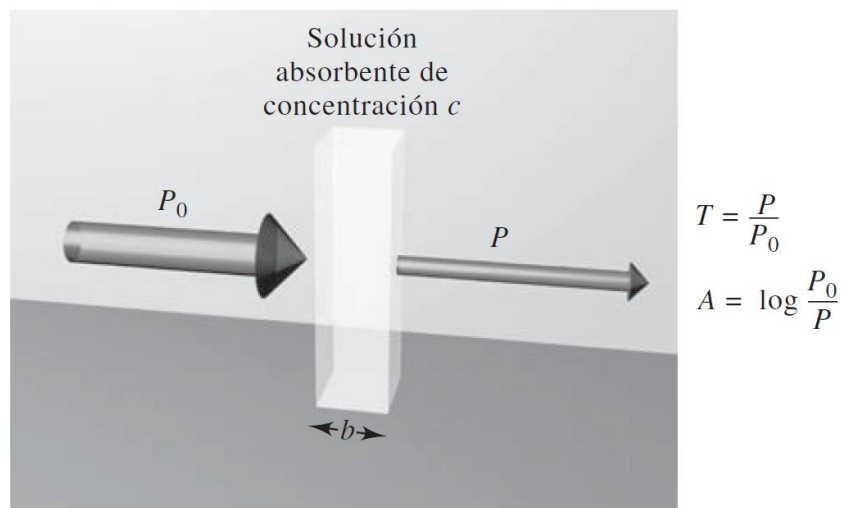
## 1.2.2. Métodos de absorción

Los métodos cuantitativos de absorción requieren dos medidas: una antes de que el haz pase a través del medio que contiene el analito ( $P_0$ ) y otra después ( $P$ ). Dos términos que se usan ampliamente en la espectrometría por absorción y que se relacionan con el cociente de  $P_0$  y  $P$ , son la transmitancia y la absorbancia.

### 1.2.2.1. Transmitancia

La **Figura 1.1** ilustra la definición de transmitancia y absorbancia a la vez. La flecha más grande en el rayo incidente quiere decir que hay una energía radiante superior que se transmite por la solución. El largo de la trayectoria de la solución es  $b$ , y la concentración es  $c$ .

**Figura 1.1.** Atenuación de un haz de radiación mediante una solución absorbente (Skoog *et al.*, 2008).



Se ilustra un haz de radiación paralela antes y después de que ha pasado a través de un medio que tiene un espesor de  $b$  cm y una concentración  $c$  de una especie

absorbente. Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y los átomos o las moléculas absorbentes, la potencia del rayo se atenúa desde  $P_0$  a  $P$ . La transmitancia  $T$  del medio es entonces la fracción de la radiación incidente transmitida por el medio (Skoog *et al.*, 2008)

**Ecuación 1.1.**

$$T = \frac{P}{P_0}$$

Generalmente, la transmitancia se expresa como porcentaje

**Ecuación 1.2.**

$$\%T = \frac{P}{P_0} * 100$$

### **1.2.2.2. Absorbancia**

La absorbancia  $A$  de un medio se define mediante la ecuación

**Ecuación 1.3.**

$$A = -\log_{10} T = \log_{10} \frac{P_0}{P}$$

Se puede notar que al contrario que la transmitancia, la absorbancia de un medio aumenta cuando se incrementa la atenuación de un haz (Skoog *et al.*, 2008).

### **1.2.2.3. Ley de Beer-Lambert**

En el caso de la radiación monocromática, la absorbancia es directamente proporcional a la longitud  $b$  de la trayectoria a través de un medio y la concentración  $c$  de la especie absorbente. Esta relación se representa con

**Ecuación 1.4.**

$$A = abc$$

donde  $a$  es una constante de proporcionalidad que se llama absorptividad. La magnitud de  $a$  depende de las unidades de  $b$  y  $c$ . Para soluciones de una especie absorbente,  $b$  está con frecuencia en cm y  $c$  en gramos por litro. Entonces, las unidades de la absorptividad son  $L g^{-1} cm^{-1}$ . Cuando la concentración de la **Ecuación 1.4.** se expresa en moles por litro y el largo de la celda está en centímetros, la absorptividad se llama absorptividad molar, y se representa con el símbolo especial  $\epsilon$ . Por tanto, cuando  $b$  está en centímetros y  $c$  en moles por litro se tiene,

**Ecuación 1.5.**

$$A = \epsilon bc$$

donde las unidades de  $\epsilon$  son  $L mol^{-1} cm^{-1}$ .

Las **Ecuaciones 1.4.** y **1.5.** son expresiones de la ley de Beer, la cual sienta las bases del análisis cuantitativo tanto para las mediciones de la absorción atómica como de la molecular. Hay ciertas limitaciones en la aplicación de la ley de Beer, que se aprecian como frecuentes desviaciones con relación a la proporcionalidad directa entre absorbancias y concentraciones. Las principales causas de estas desviaciones son:

- La concentración. Sólo es aplicable a disoluciones diluidas (menor  $10^{-2}$  M); en disoluciones concentradas la distancia entre partículas absorbentes es tan pequeña que se produce una modificación en la distribución de cargas de las mismas, lo que se traduce en una alteración en la capacidad de absorción a

una longitud de onda determinada. Este efecto se puede eliminar mediante dilución.

- La interacción entre el soluto y la radiación debida a mecanismos diferentes a la absorción pero que producen alteraciones en la intensidad de la luz, tales como la dispersión, reflexión, la fluorescencia, etc.
- Utilización de radiación no monocromática, puesto que la ley está definida para radiaciones con una sola longitud de onda. Sin embargo, si la calidad del equipo no es buena, se obtienen bandas de radiaciones con un estrecho intervalo de longitudes de onda.
- Falta de uniformidad de la muestra o especie absorbente, o presencia de impurezas.
- Desviaciones químicas, debidas a reacciones del absorbente con el disolvente (Skoog *et al.*, 2008).

### **1.3. COLORIMETRÍA**

El análisis colorimétrico forma parte los métodos espectrométricos, que se basa en la medición de la cantidad de luz absorbida por una solución coloreada (espectrofotometría, colorimetría) o por una suspensión (turbidimetría) o en la cantidad de luz difundida por una suspensión (nefelometría). En colorimetría, generalmente se usa luz blanca, y las determinaciones se efectúan con un colorímetro. En el caso que el equipo cuente con una celda fotoeléctrica para la medición el instrumento será un fotocolorímetro. Las técnicas fotométricas se fundamentan en la capacidad que tiene la luz de ser absorbida en un determinado medio. En una técnica fotométrica, siempre habrá una fuente luminosa, un medio que absorba la luz y un artefacto que sea capaz de medir la intensidad de la luz transmitida a través del medio absorbente.

Las técnicas colorimétricas se basan en la medida de la absorción de radiación en la zona visible por sustancias coloreadas. En algunas ocasiones, la muestra que se

desea determinar no posee color por sí misma; en tal caso, es preciso llevar a cabo un desarrollo de color empleando reactivos que dé lugar a sustancias coloreadas con la muestra que interesa estudiar.

La colorimetría y espectrofotometría no son en realidad técnicas distintas y la diferencia estriba en el tipo de instrumental empleado, de forma que se denomina colorímetro a aquellos aparatos en los que la longitud de onda con la que se va a trabajar se selecciona por medio de filtros ópticos; en los fotocolorímetros o espectrofotómetros la longitud de onda se selecciona mediante dispositivos monocromadores y una rendija, permitiendo este sistema trabajar con radiación con ancho de banda efectivo mucho menor.

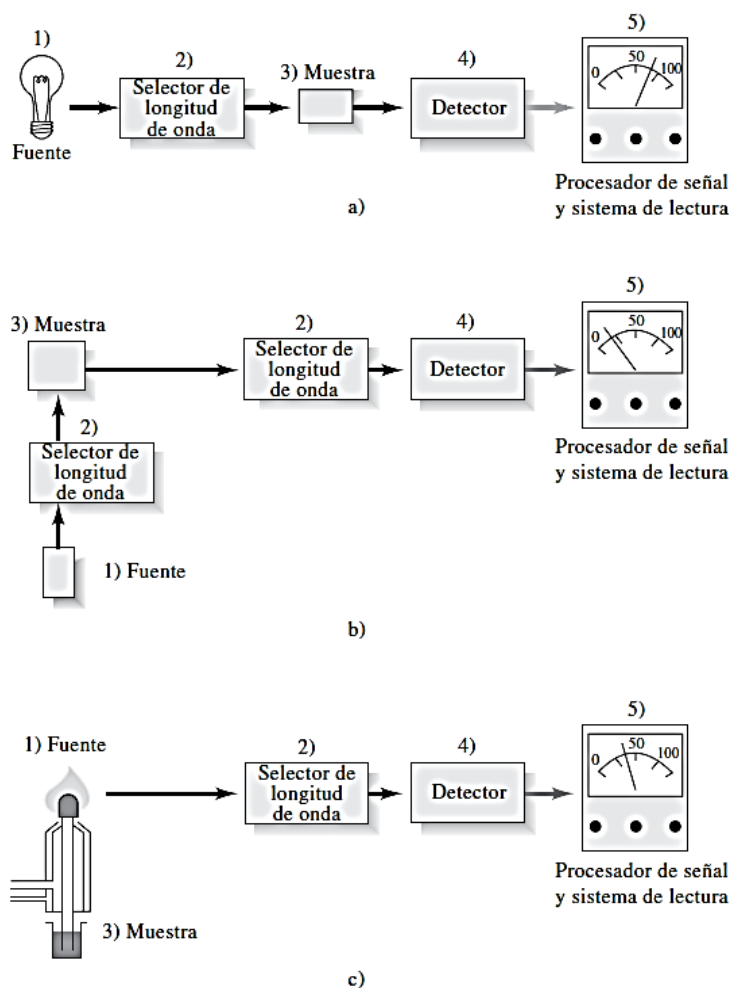
### **1.3.1. Colorímetro**

Los métodos espectroscópicos ópticos es una clasificación dentro de los métodos espectrométricos, estos métodos se apoyan en seis fenómenos, siendo estos: absorción, fluorescencia, fosforescencia, dispersión, emisión y quimioluminiscencia. Los instrumentos que miden cada uno de ellos difieren un poco en su configuración, pero la mayor parte de sus componentes básicos son muy similares. Además, las propiedades que se requieren de estos componentes son las mismas sin importar si se aplican las partes ultravioleta, visible o infrarroja del espectro (Restrepo *et al.*, 2002).

Los instrumentos espectroscópicos típicos están compuestos por cinco componentes: 1) una fuente estable de energía radiante; 2) un recipiente transparente en donde se coloca la muestra; 3) un dispositivo que aísla una región restringida del espectro para efectuar las mediciones; 4) un detector de radiación que convierte la energía radiante en una señal eléctrica útil y 5) una unidad que procesa las señales y despliega resultados, la cual exhibe la señal que entrega el transductor en la escala de un medidor, una pantalla de computadora, un medidor

digital u otro dispositivo de registro (Lindon, 2010). En la **Figura 1.2.** se ilustran los tres modos en que estos componentes están configurados para poder ejecutar las seis mediciones espectroscópicas mencionadas. En la figura también se muestra que los componentes 1, 4 y 5 están acomodados de la misma manera en cada tipo de medición. Las primeras dos configuraciones instrumentales que se usan para medir absorción, fluorescencia y fosforescencia requieren una fuente externa de energía radiante. En el caso de la absorción, siendo esta la configuración empleada en los colorímetros, el haz de la fuente pasa por el selector de longitud de onda y luego atraviesa la muestra, pero en algunos instrumentos las posiciones del selector y la muestra están invertidas. Por lo que toca a la fluorescencia y fosforescencia, la fuente induce a la muestra, que está contenida en el recipiente, a emitir una radiación característica, la cual se mide de ordinario a un ángulo de  $90^\circ$  respecto a la muestra.

**Figura 1.2.** Componentes de diversos tipos de instrumentos para espectroscopia óptica. En a) se muestra el acomodo para las mediciones de absorción. En b) se ilustra la configuración para las mediciones de fluorescencia. En c) se ilustra la configuración para la espectroscopia de emisión (Skoog *et al.*, 2008).



Las espectroscopias de emisión y de quimioluminiscencia difieren de otros tipos en que no se requiere fuente de radiación externa; la muestra misma es el emisor (véase la **Figura 1.2.c**). En la espectroscopia de emisión, el contenedor de la muestra es un plasma, una chispa o una llama que además hace que la muestra emita su radiación característica (Restrepo *et al.*, 2002). En la espectroscopia de

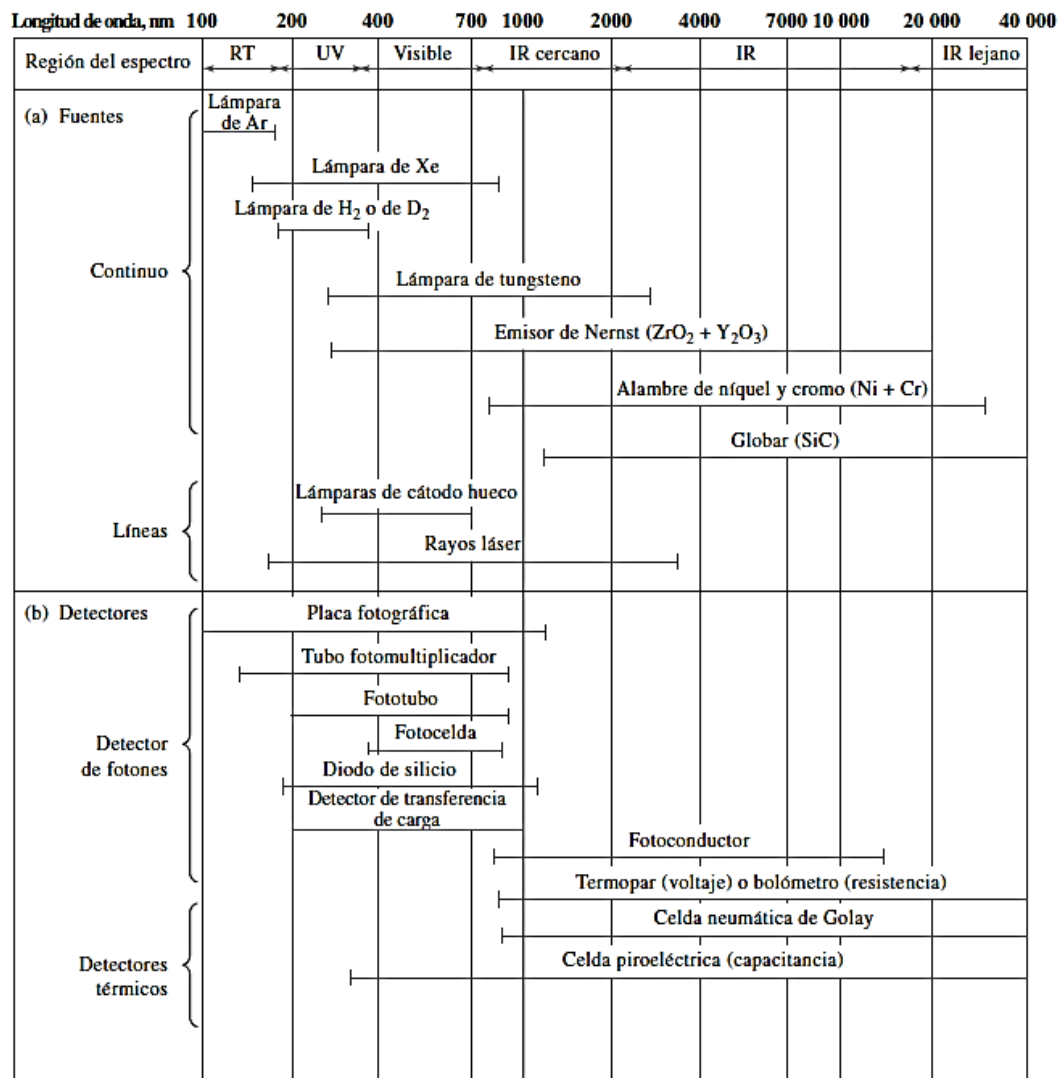
quimioluminiscencia, la fuente de radiación es una solución del analito con reactivos contenidos en un recipiente transparente. La emisión se logra con la energía que libera una reacción química en la cual el analito toma parte directa o indirectamente.

Como se mencionó antes en los colorímetros la configuración es la que se muestra en la **Figura 1.2.a**), cuyos componentes son: fuente de energía, selector de longitud de onda (generalmente se emplean filtros, aunque actualmente se emplean componentes similares a los de los espectrofotómetros), compartimiento para la muestra, detector, y el procesador de señal y sistema de lectura de la información (Skoog *et al.*, 2008).

#### **1.3.1.1. Fuente de radiación**

La potencia de salida en las fuentes de radiación debe ser estable durante periodos de tiempo razonables, además de generar un haz de energía radiante suficientemente intenso como para que se detecte y se mida con facilidad, esto se debe cumplir para que la fuente sea aceptable para los estudios espectroscópicos. Generalmente la intensidad de la radiación emitida por una fuente varía en forma exponencial con el voltaje de la fuente de alimentación. Debido a esto casi siempre se requiere de una fuente regulada para garantizar la estabilidad. Cabe señalar que en algunos equipos el problema de estabilidad de la fuente se corrige empleando un diseño de doble haz, donde el equipo calcula el cociente entre la señal proveniente de la muestra y la señal de la fuente sin muestra y se usa este cociente como la variable analítica. En estos diseños las intensidades de los dos haces se miden simultáneamente, de esta forma se corrigen las fluctuaciones que pueda tener la fuente de radiación.

**Figura 1.3. a)** Fuentes y **b)** detectores para los instrumentos espectroscópicos (Skoog *et al.*, 2008).



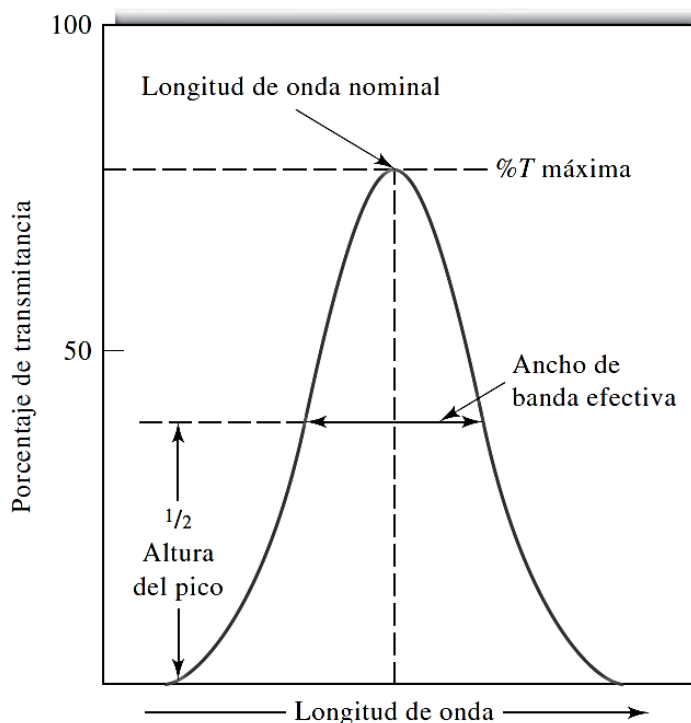
La **Figura 1.3.** muestra una lista de las fuentes espectroscópicas más utilizadas. Se puede ver que existen de dos tipos: fuentes continuas, las cuales emiten radiación cuya intensidad cambia solo lentamente en función de la longitud de onda, y las fuentes de líneas, que emiten una cantidad limitada de bandas o líneas de radiación; cada una de las cuales abarca un intervalo limitado de longitudes de onda.

Las fuentes continuas son los tipos de fuentes más utilizados en la espectroscopia de absorción y fluorescencia. Si se habla de la región UV, la fuente más común es la lámpara de deuterio. En el caso de la región visible del espectro, casi siempre se emplean lámparas de tungsteno, ampliamente utilizadas en espectrofotómetros y colorímetros (Skoog *et al.*, 2008).

### 1.3.1.2. Selectores de longitud de onda

La mayor parte de análisis espectroscópicos requiere radiación que consiste de un grupo de longitudes de onda limitadas, angostas y continuas llamadas *banda*. Un ancho de banda intensifica la sensibilidad de las medidas de absorbancia, también puede proporcionar selectividad tanto a los métodos de emisión como a los de absorción y se le requiere a menudo para obtener una relación lineal entre la señal óptica y la concentración. Idealmente, la salida desde un selector de longitud de onda sería radiación de una sola longitud de onda o frecuencia. Ningún selector de longitud de onda real se aproxima a este ideal; lo que se obtiene es una banda como la que se ve en la **Figura 1.4.**, aun así a esta radiación que se obtiene a través del selector de longitud de onda se le denomina radiación o luz monocromática. En este caso, el porcentaje de radiación incidente de una longitud de onda dada que transmite el selector se grafica en función de la longitud de onda. El ancho de banda efectivo, que se define en esta figura, es una medida inversa de la calidad del dispositivo, un ancho de banda más angosto representa un mejor rendimiento. Hay dos tipos de selectores de longitud de onda: filtros y monocromadores (Skoog *et al.*, 2008).

**Figura 1.4.** Salida de un selector característico de longitud de onda (Skoog *et al.*, 2008).



### 1.3.1.2.1. Filtros

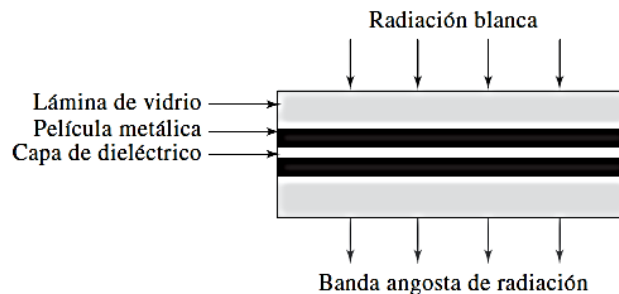
Tradicionalmente en el diseño y construcción de colorímetros se han empleado los filtros como selectores de longitudes de onda, debido a su bajo costo y simplicidad (Vogel *et al.*, 1960).

Se usan dos tipos de filtros, siendo estos; los filtros de interferencia y los filtros de absorción, teniendo una restricción estos últimos, pues solo pueden emplearse en la región visible del espectro, a diferencia de los otros que si funcionan en la región, UV, visible e infrarroja.

Como su nombre lo indica, los filtros de interferencia dependen de la interferencia óptica para proporcionar bandas angostas de radiación. Un filtro de interferencia

consiste en un dieléctrico transparente, a menudo fluoruro de calcio o fluoruro de magnesio, que ocupa el espacio entre dos películas metálicas semitransparentes. Esta combinación, a su vez, está entre dos láminas de vidrio o de otros materiales transparentes (véase la **Figura 1.5.**). El espesor de la capa dieléctrica se controla con todo cuidado y se determina la longitud de onda de la radiación transmitida. Cuando un haz perpendicular de radiación colimada choca con este acomodo, una fracción atraviesa la primera capa metálica y el resto se refleja. La parte que atraviesa sufre una división similar al chocar con la segunda capa metálica. Si la porción reflejada de esta segunda interacción tiene una longitud de onda apropiada, es reflejada parcialmente desde el lado interior de la primera capa en fase con la luz entrante que tiene la misma longitud de onda. El resultado es que esta longitud de onda particular se refuerza, y la mayor parte de las otras longitudes de onda, que están fuera de fase, sufren una interferencia destructiva (Skoog *et al.*, 2008).

**Figura 1.5.** Sección transversal esquemática de un filtro de interferencia (Skoog *et al.*, 2008).



Existen otros modelos de filtros basados en el mismo principio físico como el Interferómetro de Fabry-Perot (Ingle and Crouch, 1988), las cuñas de interferencia, los cuales ofrecen alternativas similares a los mencionados anteriormente.

Los filtros de absorción, como su nombre lo evidencia están basados en otro principio físico y tienen la ventaja de ser más baratos que los filtros de interferencia, se usan ampliamente para selección de bandas en la región visible. Su tarea es

absorber porciones seleccionadas del espectro. El tipo más común consta de un vidrio coloreado o de un colorante suspendido en gelatina y colocado entre dos láminas de vidrio. Los filtros de vidrio coloreado tienen la ventaja de poseer una estabilidad térmica mayor.

Una desventaja de los filtros de absorción es que presentan un ancho de banda efectivo entre 30 y 250 nm a diferencia de los de interferencia que está entre 10 y 50 nm, siendo más selectivos estos últimos, generalmente los filtros de interferencia también tienen una transmitancia menor que los de interferencia, absorbiendo parte de la radiación deseada. Aunque por otro lado, existen los llamados filtros de corte cuya transmitancia es de casi 100% en una parte específica del espectro visible, y mediante combinaciones entre dos o más filtros de este tipo se puede obtener bandas estrechas y con transmitancia aceptable (Skoog *et al.*, 2008).

#### **1.3.1.2.2. Monocromadores**

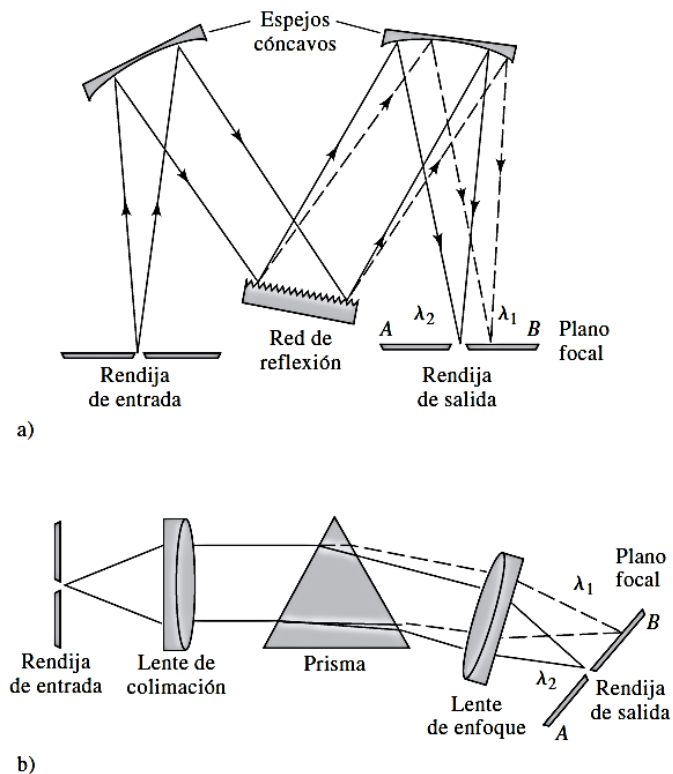
Estos se emplean cuando se requiere variar la longitud de onda de forma continua, a fin de hacer un barrido en un intervalo del espectro electromagnético para construir un espectro de la muestra. El diseño en los monocromadores para la radiación ultravioleta, visible e infrarroja son similares, lo único que los diferencia es el material del que están contruidos

En la **Figura 1.6.** se pueden apreciar los diferentes elementos ópticos que componen los monocromadores, siendo estos:

1. Una rendija de entrada para la radiación, generalmente de forma rectangular
2. Un espejo o lente colimador que proporciona un haz paralelo de radiación
3. Una red o prisma que descomponen la radiación en las longitudes de onda que la conforman
4. Un elemento de enfoque que reforma la imagen de la ranura de entrada y la enfoca sobre una superficie plana denominada plano focal

5. Una rendija de salida en el plano focal que aísla la banda espectral deseada. Además, la mayoría de los monocromadores posee ventanas de entrada y de salida diseñadas para proteger a los componentes del polvo y las emisiones corrosivas del laboratorio.

**Figura 1.6.** Dos tipos de monocromadores: **a)** monocromador Czerny-Turner de red y **b)** monocromador Bunsen de prisma. (En ambos,  $\lambda_1 > \lambda_2$ ) (Skoog *et al.*, 2008).



Como se muestra en la figura anterior, hay dos tipos de elementos dispersores en los monocromadores, estos son, redes y prismas de reflexión. Para describir su función, se ilustra un haz formado justamente por dos longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ). Esta radiación entra en el monocromador por medio de una abertura rectangular angosta mejor conocida como rendija; se alinea, y luego choca contra

la superficie del elemento dispersor a un cierto ángulo. En el monocromador de red, la dispersión angular de las longitudes de onda es el resultado de la difracción, la cual se presenta en la superficie reflectora; en cuanto al prisma, la refracción en las dos caras da como resultado una dispersión angular de la radiación, como se muestra. En ambos diseños, la radiación dispersada se enfoca en el plano focal AB donde aparece como dos imágenes rectangulares de la rendija de entrada, una para  $\lambda_1$  y otra para  $\lambda_2$ . Al girar el elemento dispersor, una banda o la otra se puede enfocar en la rendija de salida.

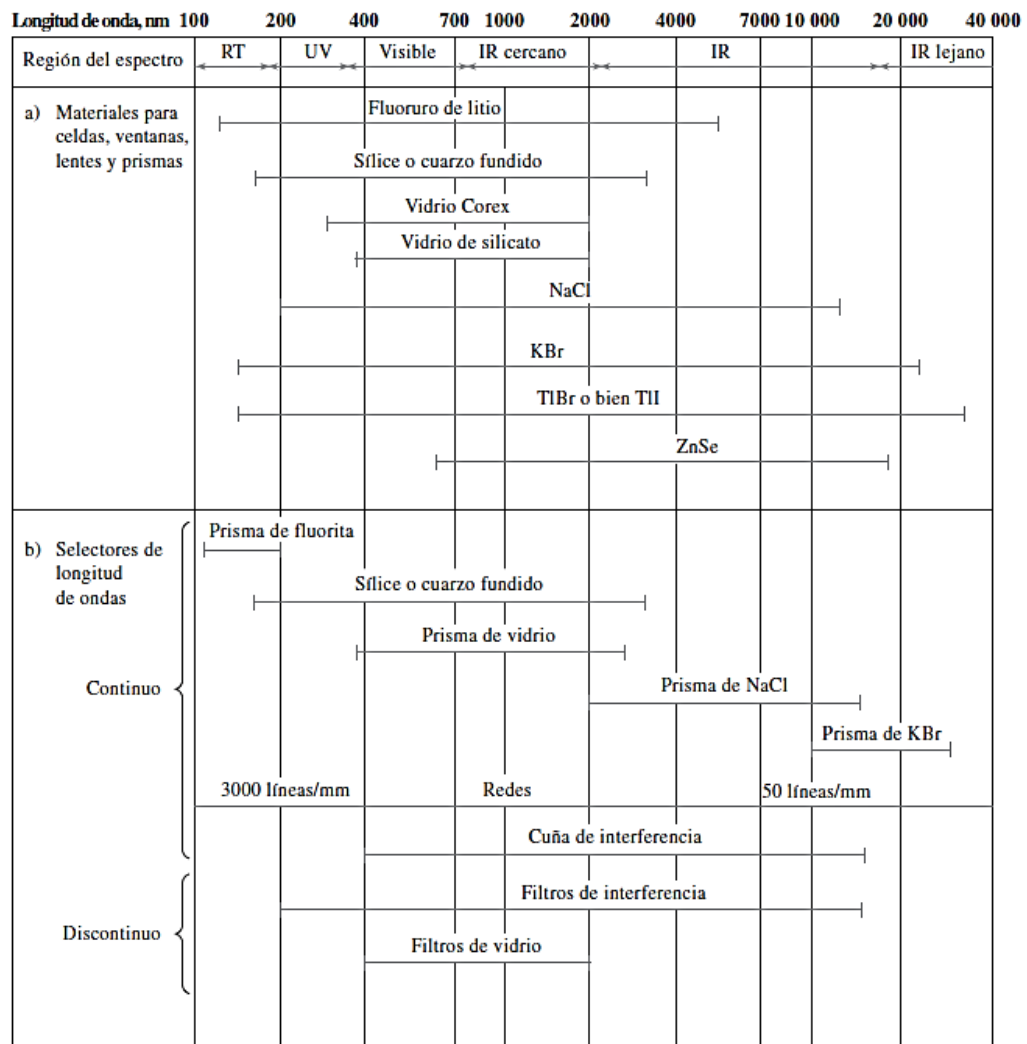
Los monocromadores antiguos eran casi todos instrumentos basados en prismas. Actualmente, casi todos los que están disponibles en el comercio se basan en redes de reflexión porque son más baratas de fabricar, proporcionan mejor separación de longitudes de onda que un elemento dispersor del mismo tamaño y dispersan la radiación en forma lineal a lo largo del plano focal. Como se puede ver en la **Figura 1.6.**, dispersión lineal quiere decir que la posición de una banda a lo largo del plano focal para una red varía en forma lineal con su longitud de onda. Por lo que se refiere a los instrumentos con prismas, las longitudes de onda más pequeñas se dispersan a un grado mayor que las más grandes, lo cual complica el diseño del instrumento (Skoog *et al.*, 2008).

### 1.3.1.3 Recipientes para las muestras

Todos los análisis espectroscópicos excepto la espectroscopia de emisión, requieren recipientes para la muestra. De igual forma que los elementos ópticos de los monocromadores, las celdas o cubetas donde se colocan las muestras deben ser de un material transparente a la radiación en la región del espectro que interese, es decir que no interactúe o lo haga de la menor forma posible la radiación electromagnética con el material de la celda. Por consiguiente, como se ilustra en la **Figura 1.7. a)**, el cuarzo o la sílice fundido se usan para trabajar en la región UV, abajo de 350 nm. Estas dos sustancias son transparentes en la región visible y

también por arriba de casi 3  $\mu\text{m}$  en la región infrarroja. Los vidrios de silicato se pueden usar en la región entre 350 y 2000 nm. Los contenedores de plástico también se usan en la región visible. El cloruro de sodio cristalino es la sustancia que más se usa para las ventanas de las celdas en la región infrarroja; los otros materiales transparentes al infrarrojo que se enlistan en la **Figura 1.7.** también se podrían usar para este fin (Skoog *et al.*, 2008).

**Figura 1.7. a)** Materiales de construcción y **b)** selectores de longitud de onda para instrumentos espectroscópicos (Skoog *et al.*, 2008).



#### 1.3.1.4. Transductores de radiación

Los detectores para los primeros instrumentos espectroscópicos eran el ojo humano o una placa o película fotográficas. Actualmente los transductores que convierten la energía radiante en una señal eléctrica han reemplazado casi por completo a estos dispositivos de detección.

El transductor ideal debe tener una alta sensibilidad, una alta relación señal-ruido y una respuesta constante a un amplio intervalo de longitudes de onda. Además, debe tener un tiempo de respuesta rápido y una señal de salida cero si no hay iluminación. Para terminar, la señal eléctrica producida por el transductor ideal debe ser directamente proporcional a la potencia radiante  $P$ . Es decir:

**Ecuación 1.6.**

$$S = kP$$

$S$  es la salida de corriente o voltaje del transductor y  $k$  es la sensibilidad de calibración.

Muchos transductores reales manifiestan una respuesta pequeña constante, conocida como corriente residual cuando no hay radiación. En este caso, la respuesta se expresa mediante la relación

**Ecuación 1.7.**

$$S = kP + k_d$$

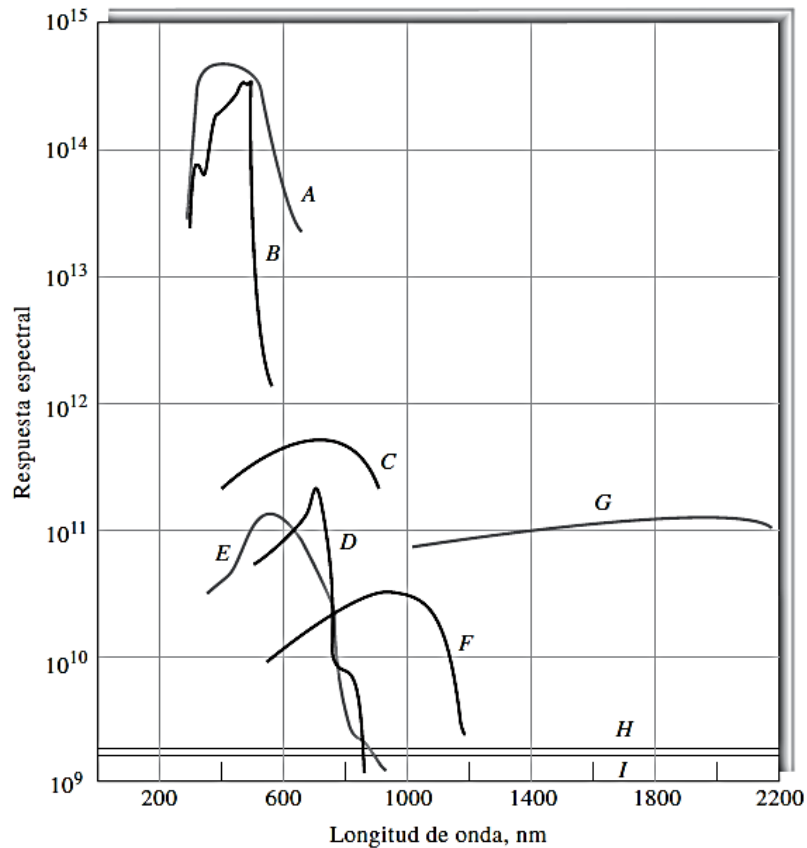
$k_d$  representa la corriente residual, la cual suele ser constante en periodos de medición cortos. Por lo regular, los instrumentos con transductores que producen

una corriente residual están equipados con un circuito de compensación que reduce  $k_d$  a cero; entonces se aplica la **Ecuación 1.6.**

Existen dos tipos generales de transductores de radiación. Un tipo responde a fotones y el otro al calor.

Todos los transductores de fotones, también conocidos como detectores fotoeléctricos o de cuantos, tienen una superficie activa que absorbe la radiación. En algunos tipos, la energía absorbida causa emisiones de electrones y hace que se produzca una corriente fotoeléctrica. En otros, la radiación impulsa a los electrones a las bandas de conducción. Aquí, la detección se basa en la conductividad resultante mejorada (fotoconducción). Los transductores de fotones se usan ampliamente en las mediciones de radiaciones UV, visible e infrarroja cercana. Cuando se utilizan en radiación con longitud de onda mucho mayor que 3  $\mu\text{m}$  estos transductores deben ser enfriados con hielo seco o a temperatura de nitrógeno líquido para evitar la interferencia del ruido térmico de fondo. Los transductores fotoeléctricos producen una señal eléctrica que es resultado de una serie de fenómenos individuales (la absorción de fotones simples), cuya probabilidad se puede describir mediante estadística. En cambio, los transductores térmicos, que se utilizan ampliamente en la detección de radiación infrarroja, son sensibles a la potencia promedio de la radiación incidente. La distinción entre transductores de fotones y transductores térmicos es importante porque el ruido de disparo limita con frecuencia el comportamiento de los transductores de fotones y el ruido térmico restringe a menudo a los transductores térmicos (Skoog *et al.*, 2008).

**Figura 1.8.** Respuesta relativa de varios tipos de transductores fotoelectricos (A-G) y transductores termicos (H, I): A, tubo fotomultiplicador; B, fotoconductividad de CdS; C, celdas fotovoltaicas de GaAs; D, celda de fotoconductividad de CdSe; E, celda fotovoltaica de Se/SeO; F, fotodiodo de silicio; G, fotoconductividad de PbS; H, termopar; I, celda de Golay (Skoog *et al.*, 2008).



En la **Figura 1.8.** se ilustra la respuesta espectral relativa de las varias clases de transductores que son útiles para las espectroscopías UV, visible e infrarroja. La función de las ordenadas guarda una relación inversamente proporcional con el ruido de los transductores y directamente proporcional con la raíz cuadrada de su área superficial. Se puede observar que la sensibilidad relativa de los transductores térmicos (curvas H e I) es independiente de la longitud de onda, pero significativamente inferior a la sensibilidad de los transductores fotoeléctricos. Por otro lado, los transductores de fotones están a menudo lejanos del ideal respecto a la respuesta constante en función de la longitud de onda.

En el diseño y construcción de colorímetros, se emplean los traductores de fotones como detectores de la señal electromagnética proveniente de la muestra, debido a que este tipo de instrumentos emplea radiación de tipo fotónica dentro del espectro visible y UV (Skoog *et al.*, 2008).

#### **1.3.1.4.1 Transductores de fotones**

Hay varios tipos de transductores de fotones; entre los cuales están 1) las celdas fotovoltaicas, en las cuales la energía radiante genera una corriente en la interfase de una capa de semiconductor y un metal; 2) fototubos, en los cuales la radiación ocasiona la emisión de electrones de una superficie sólida fotosensible; 3) tubos fotomultiplicadores que cuentan con una superficie fotoemisiva así como varias superficies adicionales que emiten una cascada de electrones cuando son golpeadas por electrones provenientes del área fotosensible; 4) transductores de fotoconductividad en los que la absorción de radiación por un semiconductor produce electrones y huecos, lo cual causa una mejora de la conductividad; 5) fotodiodos de silicio, en los cuales los fotones ocasionan la formación de pares electrón-hueco y una corriente con polarización inversa en una unión PN; y 6) transductores de transferencia de carga, en los cuales se recolectan y se miden las cargas que se desarrollan en un cristal de silicio como resultado de la absorción de fotones (Skoog *et al.*, 2008).

##### **1.3.1.4.1.2. Transductores de fotoconductividad**

Los transductores más sensibles para detectar radiación en la región del infrarrojo cercano (0.75 a 3  $\mu\text{m}$ ) son semiconductores cuyas resistencias disminuyen cuando absorben radiación dentro de este intervalo. Los valores útiles de los fotoconductores se pueden extender dentro de la región del infrarrojo lejano mediante enfriamiento; el objetivo es suprimir el ruido que surge de las transiciones inducidas térmicamente entre niveles de energía muy cercanos entre sí. Esta

aplicación de los fotoconductores es importante para la instrumentación de la transformada de Fourier en el infrarrojo. Los semiconductores cristalinos se forman a partir de sulfuros, seleniuros y antimoniuros de metales como plomo, cadmio, galio e indio. La absorción de la radiación por parte de estos materiales impulsa a algunos de sus electrones de enlace a un estado energético en el cual son libres de conducir electricidad. Este cambio resultante en la conductividad se puede medir con un circuito acoplado que detecte los cambios en conductividad y los transforme a una señal eléctrica medible (Areny, 2003).

El sulfuro de plomo es el material fotoconductor más ampliamente usado que se puede utilizar a temperatura ambiente. Los transductores de sulfuro de plomo son sensibles en la región entre 0.8 y 3  $\mu\text{m}$  ( $12\,500$  a  $3300\text{ cm}^{-1}$ ). Una capa delgada de este compuesto se deposita sobre láminas de vidrio o cuarzo para formar la celda. Luego, el ensamble completo se coloca en un recipiente al vacío, y se sella para evitar que el semiconductor reaccione con la atmósfera. La sensibilidad de los transductores de sulfuro de cadmio, de seleniuro de cadmio y de sulfuro de plomo se muestra mediante las curvas  $B_{\text{DyG}}$  de la **Figura 1.8**. No obstante actualmente se han desarrollado transductores de esta naturaleza que responden a longitudes de onda más energéticas, adentrándose de esta forma a la de la región visible del espectro electromagnético (Skoog *et al.*, 2008).

#### **1.3.1.5. Procesadores de señales y sistemas de lectura**

El procesador de señal es generalmente un dispositivo electrónico que amplifica la señal eléctrica proveniente del transductor. Además, puede cambiar la señal de corriente continua (cd) a corriente alterna (ca), o a la inversa, cambiar la fase de la señal y filtrarla para eliminar componentes no deseados. Además, el procesador de señales puede utilizarse para llevar a cabo operaciones matemáticas en la señal, como diferenciar, integrar o convertir a logaritmo. Se puede encontrar diferentes tipos de dispositivos que despliegan la información en los instrumentos modernos. Entre ellos se incluyen el medidor de D'Arsonval, medidores digitales, registradores,

tubos de rayos catódicos, paneles de pantallas de cristal líquido y pantallas de computadora (Skoog *et al.*, 2008).

Cabe señalar que actualmente el dispositivo procesador de señal por excelencia es el computador, debido a su potencia en la realización de cálculos y su lenguaje universal, permitiendo analizar, modificar y cuantificar las señales casi al instante.

#### 1.4. LÍMITE DE DETECCIÓN (LOD) Y LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN (LOQ)

Los límites de detección son determinados usualmente mediante información obtenida por las curvas de calibración. De acuerdo a la definición de la IUPAC, el límite de detección (LOD) para un determinado elemento es la concentración correspondiente a la señal cuya intensidad es igual a tres veces la desviación estándar a partir de la señal de fondo o señal del blanco,  $S_B$ :

**Ecuación 1.8**

$$LOD = 3 \frac{S_B}{S}$$

$S$  es la pendiente de la curva de calibración ( o también denominada sensibilidad). Definida la magnitud que establece el umbral para distinguir entre una señal de emisión y el ruido instrumental, se continúa con la magnitud que establece el umbral de cuantificación, La **Ecuación 1.9.** muestra la definición para este otro parámetro: el límite de cuantificación (LOQ). Posee los mismos términos de la **Ecuación 1.8.**, pero multiplicados por un factor de 10.

**Ecuación 1.9**

$$LOQ = 10 \frac{S_B}{S}$$

## **1.5. CIRCUITO ELÉCTRICO**

Un circuito es un procesador de energía o señal (información), formado por la interconexión de elementos o componentes simples tales como resistencias, inductores, condensadores, fuentes, interruptores y semiconductores. La energía en un circuito puede ser suministrada, absorbida, almacenada o convertida (Salazar, 2009).

Tal como se ha dicho, todos los circuitos eléctricos disponen de componentes básicos, de manera que se obtenga un paso de corriente eléctrica por el dispositivo de salida que se necesite. En principio, para que exista circulación de la corriente eléctrica se necesita que el circuito este cerrado (Donate, 2011).

### **1.5.1. Componentes electrónicos**

Los componentes electrónicos son aquellos dispositivos que hacen parte de un circuito electrónico. Generalmente están encapsulados en un material cerámico, metálico o plástico, y terminar en dos o más terminales o patillas metálicas. Están diseñados para ser conectados entre ellos, normalmente mediante soldadura, a un circuito impreso, para formar el mencionado circuito.

Se pueden clasificar de varias formas, aunque la más extendida los agrupa en: pasivos y activos. Dentro del grupo de componentes pasivos se pueden distinguir dos subgrupos: los fijos y los variables, pudiendo estos últimos poder modificar su valor realizando algún tipo de movimiento o giro, o mediante algún parámetro externo: temperatura, luz, presión, etc. (Montero, 2009).

#### **1.5.1.1. Componentes activos**

Los componentes activos son aquellos que son capaces de controlar los circuitos o de realizar ganancias. Fundamentalmente son los generadores eléctricos y ciertos

componentes semiconductores. Estos últimos, en general, tienen un comportamiento no lineal, esto es, la relación entre la tensión aplicada y la corriente demandada no es lineal (Germán Santamaría *et al.*, 2009).

#### **1.5.1.1.1. Circuito integrado 555**

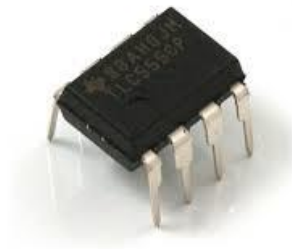
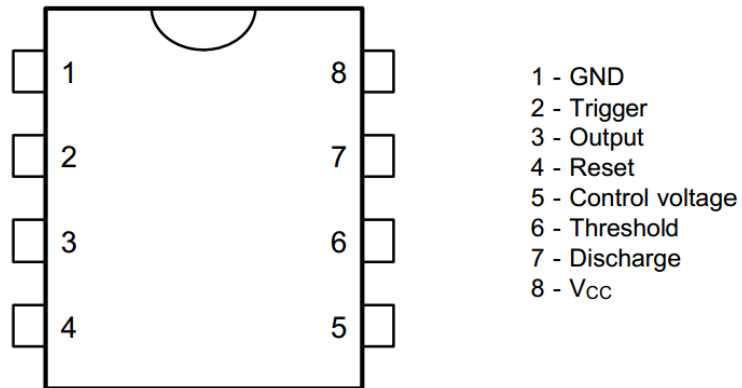
El circuito integrado 555 es uno de los integrados más utilizados en el mundo de la electrónica por su bajo costo y su gran fiabilidad, es capaz de producir pulsos de temporización (modo monoestable) muy precisos y también puede ser usado como oscilador (modo astable). Fue desarrollado y construido en el año 1971 por la empresa Signetics con el nombre: SE555.

Como se mencionó, es un circuito temporizador que genera una onda de voltaje con características on/off, donde los tiempos de encendido y apagado se pueden determinar mediante constantes de tiempo  $\tau$  proveniente de un circuito RC serie.

Las aplicaciones en las que suele ser empleado este circuito integrado son:

- Oscilador
- Temporizador
- Modulador de frecuencia
- Divisor de frecuencia
- Generador de señales rectangulares y triangulares

**Figura 1.9.** Diagrama encapsulado y apariencia real del C.I. 555 (Semiconductor, 2010).



En la **Figura 1.9.** se visualiza la forma del encapsulado del 555 y el nombre de cada uno de sus pines.

Pin 1. Tierra o masa: (Ground) Conexión a tierra del circuito (a polo negativo de la alimentación).

Pin 2. Disparo: (Trigger) En este pin es donde se establece el inicio del tiempo de retardo, si el 555 es configurado en modo monoestable. Este proceso de disparo ocurre cuando este pin va por debajo del nivel de  $1/3$  del voltaje de alimentación. Este pulso debe ser de corta duración, pues si se mantiene bajo por mucho tiempo la salida se quedará en alto hasta que la entrada de disparo pase a alto otra vez.

Pin 3. Salida: (Output) Aquí estará el resultado de la operación del temporizador, ya sea que esté funcionando como monoestable, astable u otro. Cuando la salida es alta, el voltaje será igual a  $V_{cc}$  menos 1.7 Voltios. Esta salida se puede poner a 0 voltios con la ayuda del pin 4 (Reset).

Pin 4. Reseteo: (Reset) Si este pin se le aplica un voltaje por debajo de 0.7 voltios, entonces la patilla de salida 3 se pone a nivel bajo. Si esta patilla no se utiliza hay que conectarla a  $V_{cc}$  para evitar que el 555 se resetee.

Pin 5. Control de voltaje: (Control) El voltaje aplicado a la patilla numero 5 puede variar entre un 40 y un 90% de  $V_{cc}$  en la configuración monostable. Cuando se utiliza la configuración astable, el voltaje puede variar desde 1.7 voltios hasta  $V_{cc}$ . Modificando el voltaje en esta patilla en la configuración astable causará que la frecuencia del astable sea modulada en frecuencia (FM). Si este pin no se utiliza, se recomienda ponerle un condensador de 0.01 $\mu$ F para evitar las interferencias.

Pin 6. Umbral: (Threshold) Es una entrada a un comparador interno que tiene el 555 y se utiliza para poner la salida (Pin 3) a nivel bajo.

Pin 7. Descarga: (Discharge) Utilizado para descargar el condensador externo utilizado por el temporizador para su funcionamiento.

Pin 8.  $V_{cc}$ : Este es el pin donde se conecta el voltaje positivo de la alimentación que puede ir desde 4.5 voltios hasta 16 voltios (Donate, 2011).

En el modo astable, como ya se mencionó, este circuito integrado cumple la tarea de un oscilador, emitiendo así una señal continua con una frecuencia dependiente del valor de las resistencias y el capacitor, es decir, del circuito RC que configura el C.I. 555 en modo astable (Donate, 2011).

En este modo de funcionamiento, el condensador se carga y descarga entre  $1/3 V_{cc}$  y  $2/3 V_{cc}$ . De la misma forma que sucede en el modo de disparo (monoestable), los tiempos de carga y descarga, y por lo tanto la frecuencia son independientes de la tensión de alimentación.

El tiempo de carga (salida alta) viene dado por la siguiente ecuación:

**Ecuación 1.10.**

$$t_{on} = 0.7(R1 + R2)C1$$

Y el tiempo de descarga (salida baja) por:

**Ecuación 1.11.**

$$t_{off} = 0.7(R2)C1$$

Así, el período total es:

**Ecuación 1.12.**

$$T = t_{on} + t_{off} = 0.7(R1 + 2R2)C1$$

Por lo tanto la frecuencia de oscilación en Hertz (Hz) estará dada por:

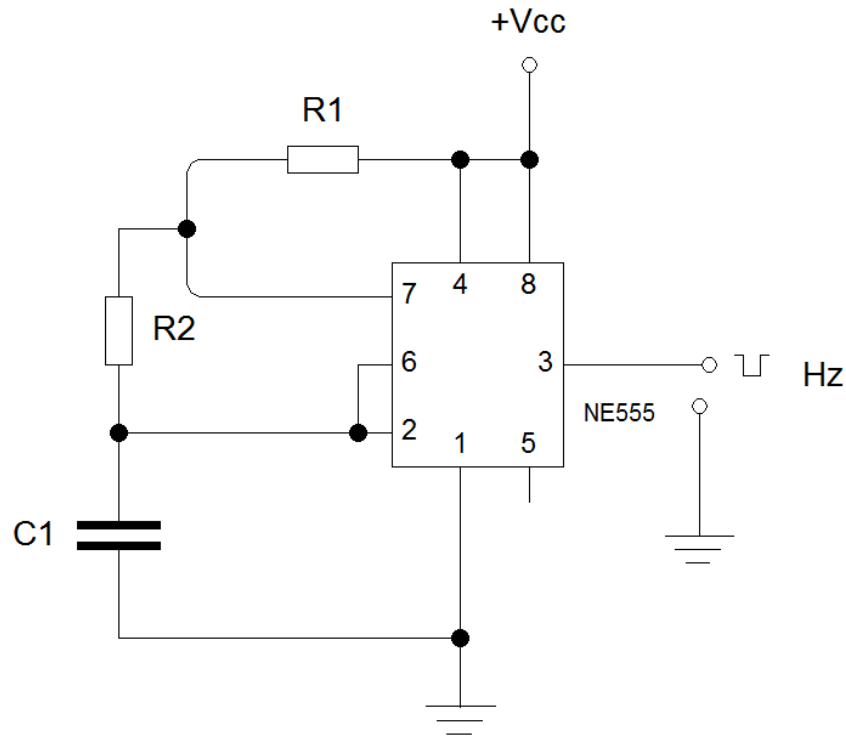
**Ecuación 1.13.**

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.7(R1 + 2R2)C1}$$

Donde  $C1$  es el valor del capacitor en faradios y  $R1, R2$  son los valores de resistencia en ohmios respectivamente, la configuración de conexión de estos componentes electrónicos se muestra en **la Figura 1.10.** A la salida del circuito se obtiene una

señal oscilatoria cuadrada, cuya frecuencia va a depender de estos tres valores incluidos en la **Ecuación 1.13**.

**Figura 1.10.** Diagrama esquemático de la configuración en modo astable del circuito integrado 555.



### 1.5.1.2. Componentes pasivos

Son aquellos que no necesitan una fuente de energía para su correcto funcionamiento. No tienen la capacidad de controlar la corriente en un circuito. Los más usuales son: el resistor o resistencia, el condensador o capacitor y la inductancia o bobina.

### 1.5.1.2.1. LED

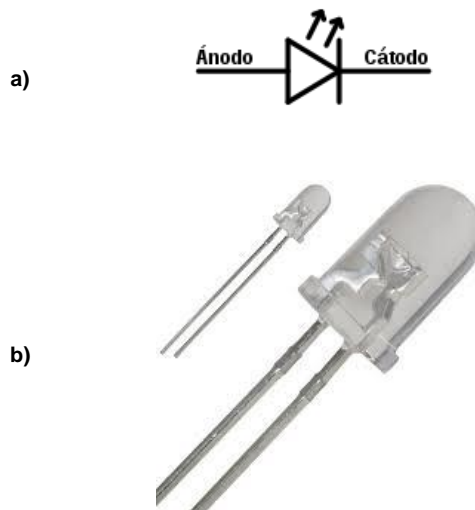
Su nombre proviene del acrónimo inglés LED, que significa Light Emitting Diode o diodo emisor de luz, está clasificado como un componente optoelectrónico pasivo. Su uso más general es como indicador en la mayoría de dispositivos electrónicos, aunque en la actualidad sus aplicaciones se han extendido desde iluminación de todo tipo hasta pantallas de vídeo, gracias a su bajo consumo y su alta eficiencia para convertir la energía eléctrica en luz (Cangeloso, 2012).

Inicialmente los LEDs se diseñaron para producir luz roja de baja intensidad, de ahí su limitada aplicación como luz indicadora, pero en la actualidad estos son capaces de emitir luz de alta intensidad en el espectro visible, ultravioleta e infrarrojo, maximizándose de esta forma su aplicación (Gago *et al.*, 2012).

En la **Tabla 1.1.** se muestra la cantidad de LEDs que existen actualmente junto a sus características.

En los esquemas electrónicos se representa mediante el símbolo mostrado en la **Figura 1.11.**

**Figura 1.11. a)** Representación simbólica y **b)** apariencia real de un LED (Alexander and Sadiku, 2006).



Una característica importante en los LEDs es la polaridad, debido a que son elementos semiconductores, debe respetarse su polaridad a la hora de conectárseles a un circuito eléctrico, como se especifica en la **Figura 1.11.**, donde se identifica el ánodo y el cátodo. En la práctica el ánodo se identifica fácilmente por ser la pata más larga del LED y en el caso del cátodo, la base del LED tiene un borde plano.

**Tabla 1.1.** Carta técnica de colores, voltajes de trabajo, potencia e intensidad, Angulo de visión y material de construcción, de los diferentes LEDs presentes en el mercado (Works, 2014).

	Wavelength (nm)	Color Name	Fwd Voltage (Vf @ 20ma)	Intensity 5mm LEDs	Viewing Angle	LED Dye Material
	940	Infrared	1.5	16mW @50mA	15°	GaAIAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Arsenide
	880	Infrared	1.7	18mW @50mA	15°	GaAIAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Arsenide
	850	Infrared	1.7	26mW @50mA	15°	GaAIAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Aluminum Arsenide
	660	Ultra Red	1.8	2000mcd @50mA	15°	GaAIAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Aluminum Arsenide
	635	High Eff. Red	2.0	200mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	633	Super Red	2.2	3500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	620	Super Orange	2.2	4500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	612	Super Orange	2.2	6500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	605	Orange	2.1	160mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	595	Super Yellow	2.2	5500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	592	Super Pure Yellow	2.1	7000mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	585	Yellow	2.1	100mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	4500K	"Incandescent" White	3.6	2000mcd @20mA	20°	SiC/GaN -- Silicon Carbide/Gallium Nitride

	6500K	Pale White	3.6	4000mcd @20mA	20°	SiC/GaN -- Silicon Carbide/Gallium Nitride
	8000K	Cool White	3.6	6000mcd @20mA	20°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	574	Super Lime Yellow	2.4	1000mcd @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	570	Super Lime Green	2.0	1000mcd @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	565	High Efficiency Green	2.1	200mcd @20mA	15°	GaP/GaP - Gallium Phosphide/Gallium Phosphide
	560	Super Pure Green	2.1	350mcd @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	555	Pure Green	2.1	80mcd @20mA	15°	GaP/GaP - Gallium Phosphide/ Gallium Phosphide
	525	Aqua Green	3.5	10,000mcd @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	505	Blue Green	3.5	2000mcd @20mA	45°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	470	Super Blue	3.6	3000mcd @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	430	Ultra Blue	3.8	100mcd @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride

La información suministrada en la tabla anterior es primordial a la hora de implementar los LEDs en un circuito electrónico, puesto que se debe garantizar que la corriente que circula por ellos no exceda los límites admisibles, ya que esto los deterioraría, dejándolos inutilizables o disminuyendo drásticamente su tiempo de vida. Cuando la fuente de alimentación de corriente eléctrica entrega un voltaje superior al voltaje de trabajo de los LEDs, esto se soluciona conectando una resistencia en serie con estos, y el valor  $R$  de esta resistencia puede ser calculado mediante la ley de ohm según la **Ecuación 1.14**.

**Ecuación 1.14.**

$$R = \frac{V_{fuente} - V_{led}}{I_{led}}$$

Siendo,  $V_{fuente}$  el valor del voltaje de la fuente que suministrara la corriente eléctrica,  $V_{led}$  y  $I_{led}$  los valores de voltaje y corriente normales de trabajo del LED, los cuales son suministrados por los fabricantes.

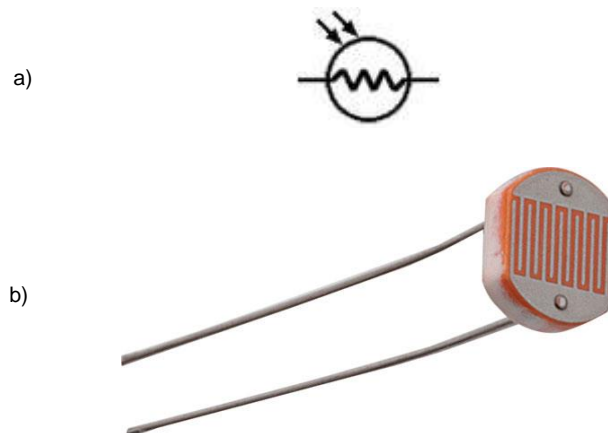
### 1.5.1.2.2. Fotorresistencia

También conocida como LDR por sus siglas en ingles "*light-dependent resistor*", se define como un componente electrónico cuyo valor de resistencia es dependiente de la intensidad de la luz que se irradie sobre su superficie.

Esto se debe a que este componente funciona en base al efecto fotoeléctrico (Moreno and Martínez), por lo general, la resistencia disminuye a medida que aumenta la intensidad de la luz que recibe. Los valores típicos varían entre  $1\text{ M}\Omega$ , o más, en la oscuridad y  $100\ \Omega$  con luz brillante (Components, 1997).

Un gran número de sustancias diferentes se caracteriza por esta propiedad, incluyendo el selenio, el silicio y otros compuestos, siendo el sulfuro de cadmio el más empleado en la actualidad

**Figura 1.12. a)** Representación simbólica y **b)** apariencia real de un LDR (Donate, 2011).



El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de la décima de segundo. Otra de sus principales características es su alta sensibilidad, pues con pequeñas variaciones de la intensidad lumínica se observan cambios considerables en su valor de resistencia (Tsusho, 2002).

Se emplean en iluminación, apagado y encendido de alumbrado (interruptores crepusculares), en alarmas, en cámaras fotográficas, en medidores de luz. Las de la gama infrarroja en control de máquinas y procesos de contaje y detección de objetos.

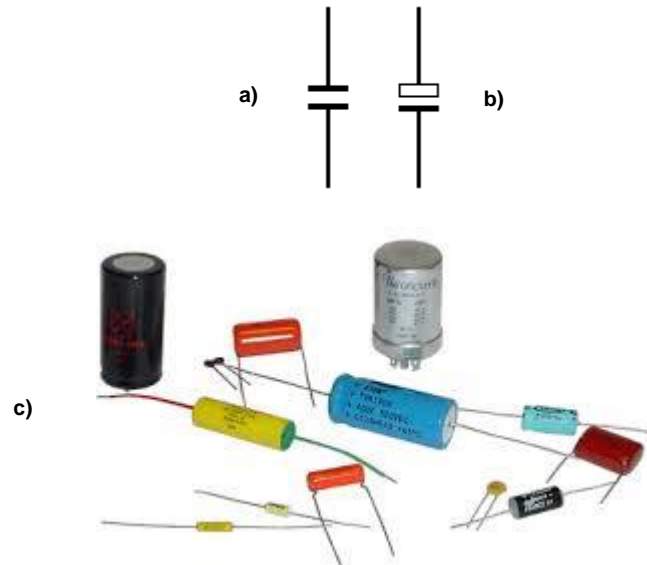
#### **1.5.1.2.3. Condensadores**

También nombrado capacitor, es un componente electrónico pasivo cuya función es almacenar energía eléctrica en forma de campo eléctrico. Después de la resistencia eléctrica es el componente más utilizado en electricidad y electrónica. En electrónica se utiliza para acondicionar señales y proteger circuitos integrados; y en sistemas de potencia se utiliza principalmente para mejorar el factor de potencia.

Conceptualmente, un condensador consta de dos placas o laminas conductoras separadas por un dieléctrico que presentan en su conjunto la propiedad eléctrica de capacidad. La disposición de las placas en las ejecuciones reales es muy variada según las clases y tipos comerciales, pero siempre se cumple la condición física de estar en dieléctrico entre las placas. Como dieléctrico se usan: aire, papel mica cerámica y electrolitos (Germán Santamaría *et al.*, 2009).

Existe gran variedad de condensadores, y sus tamaños como aplicaciones varían en gran medida, en la **Figura 1.13.** se muestra el símbolo y varias imágenes con el aspecto real de algunos condensadores.

**Figura 1.13.** Representación simbólica y apariencia real de los condensadores, **a)** símbolo para condensadores cerámicos, **b)** símbolo para condensadores electrolíticos y **c)** diferentes tipos de condensadores presentes en el mercado (Donate, 2011).



En la figura anterior se muestra el símbolo para dos tipos de condensadores, el símbolo **a)** no presenta diferencia alguna en sus dos terminales, a diferencia de **b)** en el cual se debe considerar la polaridad, en esta la conexión positiva se hace al terminal superior, que se representa con un rectángulo sin relleno. En los condensadores reales, la polaridad de estos viene indicada en el cascarón con una línea negra o con el símbolo negativo impreso junto al terminal, también como en los LEDs el terminal negativo viene más corto para facilitar su identificación (Donate, 2011).

#### 1.5.1.2.4 Resistencia eléctrica

También llamado resistor, es un componente eléctrico pasivo que establece una relación de proporcionalidad entre la intensidad de corriente que la atraviesa y la

diferencia de potencial medible entre sus extremos, a esta relación se le denomina ley de Ohm, la cual se expresa en la **Ecuación 1.14**.

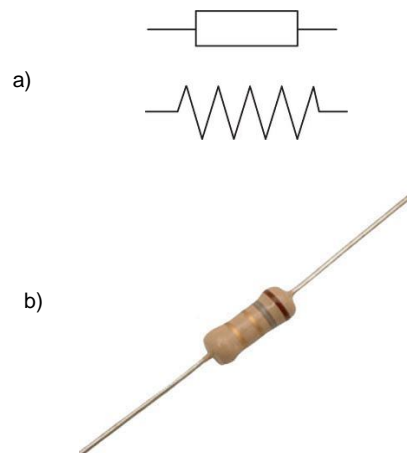
**Ecuación 1.14.**

$$V = I.R$$

La anterior ecuación se cumple para la corriente continua, donde  $R$  es la resistencia en ohmios,  $V$  es la diferencia de potencial en voltios e  $I$  es la intensidad de corriente en amperios (Moreno and Martínez).

Este dispositivo disipa la energía en forma de calor según la ley de Joule, y pese a que no es un elemento ideal, su comportamiento se aproxima bien al descrito por la **Ecuación 1.14**. (Donate, 2011).

**Figura 1.14. a)** Representación simbólica y **b)** apariencia real de las resistencias eléctricas (Donate, 2011).



En la **Figura 1.14. a)** se muestra la representación simbólica des resistencias, típicamente se usan esos dos esquemas, el aspecto real de una resistencia es el mostrado en **b)**, se pueden notar 4 franjas de colores en su cuerpo cilíndrico, la función de estas es indicar el valor de la resistencia en ohmios, donde las tres primeras franjas describen su valor y la ultima la tolerancia con la que fue fabricada.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La búsqueda de nuevos desarrollos instrumentales con la finalidad de determinar parámetros de interés para gran cantidad de aplicaciones en diversas áreas del conocimiento, requiere de elevadas inversiones. Por lo que el diseño y mejora de estos instrumentos es de gran importancia al momento de buscar agudizar sus principales ventajas como su simplicidad operacional, bajo costo y consumo de energía y la reducción de tamaño de la configuración del equipo para facilita las posibilidades de ser empleado como equipo portátil para análisis *in situ* (Dasgupta *et al.*, 1993).

Atendiendo a lo anterior, el interés de la reducción de tamaño de instrumentos para las mediciones de campo, con diodos emisores de luz (LEDs) con el paso del tiempo los instrumentos ópticos y en particular los fotómetros LED se han convertido en los más empleados. Lo anterior se debe a que en los fotómetros LED, el tiempo de retardo entre la activación secuencial de los emisores y mediciones individuales en varias longitudes de onda es muy baja (del orden de décimas de segundo), como en un espectrofotómetro de diodos (Koel and Kaljurand, 2006).

Hasta la actualidad son diversas las aplicaciones de fotómetros LED en las diferentes regiones del espectro electromagnético las cuales están presentes en la literatura. Para hacer una breve reseña de estas, a continuación se mencionaran algunas de las más relevantes.

En la región UV, se han desarrollado instrumentos para la determinación de sulfato en agua (Zárate *et al.*, 2011), la acidez en zumos de frutas (Silva *et al.*, 2010), nitrito y nitrato en el agua (Zhang *et al.*, 2011), entre otros.

Por ejemplo, Zarate y colegas (Zárate *et al.*, 2011) propusieron un procedimiento automático para la determinación turbidimétrica de sulfato en el agua de lluvia sobre la base de un proceso de análisis de flujo de multiconmutación usando un fotómetro con un LED ( $\lambda = 420$  nm), una célula de flujo con una trayectoria óptica de 100 mm y un fotodiodo. Posteriormente, en 2010, Silva y sus colegas (Silva *et al.*, 2010) describen un fotómetro de bajo coste basada en un par idéntico de LEDs ( $\lambda = 531$  nm): un empleado como una fuente de luz y el otro como un fotodetector. Además del equipo, incluyendo el fotómetro y el módulo de análisis, se diseñó un procedimiento de valoración automática utilizando análisis por flujo multiconmutado (MCFIA).

Liu y sus colegas (Zhang *et al.*, 2011) propusieron un fotómetro-LED que operaba en la región UV ( $\lambda = 255$  nm) para la determinación del total de nitrito y nitrato en el agua. En este estudio, se encontró que los límites de detección de nitrito y nitrato eran de 7 mol/L y 12 mol/L, respectivamente.

A su vez, la región NIR ofrece ventajas adicionales para aplicaciones analíticas de los fotómetros LED, tales como un carácter no destructivo, la versatilidad y la posibilidad de análisis *in situ*. Sin embargo, el gran ancho de banda del LED (30 a 50 nm), los pasos de pre-concentración y la necesidad de herramientas quimiométricas limitan el trabajo en esta región. Sin embargo, varias aplicaciones de fotómetros basados en LED NIR se pueden encontrar en la literatura para la determinación de clorofilas (McClure *et al.*, 2002), la adulteración de la gasolina (Gaião *et al.*, 2008), lubricantes (Pignalosa *et al.*, 2007) y otros (Hyvarinen and Niemela, 1990).

Hay múltiples ejemplos de fotómetros LED que operan en la región UV-vis y combinadas con el análisis quimiométrico. Por ejemplo, Fonseca y sus colegas describen el desarrollo de un fotómetro-LED multicanal portátil que opera en la región visible (Fonseca and Raimundo Jr, 2004) y es utilizado para la

determinación simultánea de Zn y Cu en las formulaciones farmacéuticas. Los mismos autores aplicaron este fotómetro-LED multicanal en 2007 (Fonseca and Raimundo Jr, 2007) para la discriminación de las muestras de agua mineral utilizando herramientas quimiométricas. Además, Hauser y sus colegas (Hauser and Rupasinghe, 1997) describen un fotómetro-LED multicanal en la región visible para determinar diversas especies en solución, incluyendo amoníaco, Cu, Al, Ca, Cr, fosfato y nitrito. Los errores relativos basados en las mediciones de concentración fueron entre 0,2 y 5,0%.

Finalmente, los instrumentos basados en LEDs a lo largo del tiempo han buscado presentar un montaje sencillo y de bajo costo, ya que son muy versátil y pueden ser empleados en la determinación de muchos parámetros químicos, con resultados prometedores. Así, el objetivo de este trabajo fue el desarrollo de uno en la región del espectro electromagnético visible para la determinación de concentraciones de compuestos en solución acuosa.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO**

En el diseño del colorímetro se buscó construir un equipo con alta sensibilidad, robustez y portabilidad, lo cual se obtuvo luego de comparar las diferentes características de dos prototipos iniciales y efectuar pruebas preliminares.

El prototipo inicial se desarrolló a partir de un montaje simple en el cual se incluyó una fuente puntual de radiación (LED), un porta muestra, un detector de la radiación o transductor de fotoconductividad (LDR) y un circuito conversor de variaciones en una propiedad física (en este caso variaciones en la resistencia eléctrica del LDR) a cambios en una señal eléctrica, específicamente en su frecuencia. Además de lo anterior, se diseñó una interfaz que conectó el circuito conversor con la tarjeta de sonido de cualquier computadora, los cuales cumplen la función de procesador de señal y sistema de lectura mediante un software.

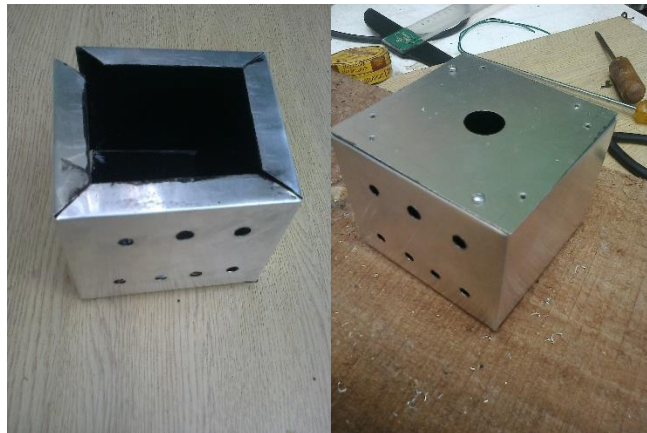
Luego de poner a prueba este prototipo inicial y observar que se registraban variaciones en las medidas de la señal, producto de cambios en la concentración; se desarrolló un segundo prototipo en el que se incluyeron mejoras en algunas partes del diseño. Se llevó a cabo una ampliación en el espectro electromagnético de la fuente de radiación, lo cual se logró incluyendo tres LEDs y sus respectivo interruptores con diferentes longitudes de onda, soportados en una base rotatoria para permitir la selección individual de cada uno de ellos y maximizar su aplicación. Además, se incluyó una caja de cartón en la que se confino el sistema fuente de radiación-celda-detector, a fin de minimizar la incidencia de la radiación del ambiente sobre el detector.

A partir de los dos prototipos descritos previamente se estableció el diseño definitivo del colorímetro. El instrumento está compuesto de las siguientes partes:

### 3.1.1. Caja oscura

Consiste en una caja con geometría cubica construida en aluminio, con su interior de color negro-mate de 10 cm de largo por 10 cm de ancho por 8 cm de alto, a esta se le perforaron siete orificios en la parte delantera para los respectivos interruptores y controles del equipo y un orificio en la parte superior para introducción de la celda, estos detalles pueden apreciarse en la **Figura 3.1.** donde se muestran dos vistas de la caja oscura. Las razones por la que se escogió el aluminio como material de construcción de esta, fueron principalmente la robustez que brinda este material al equipo y el blindaje electromagnético debido a que es un material conductor de la electricidad.

**Figura 3.1.** Caja oscura.



### 3.1.2. Fuente de radiación

Está compuesta de un sistema de LEDs de chorro-interruptores, cada uno de estos LEDs se escogió con longitudes de onda diferentes, con lo que se buscó abarcar en

gran medida el espectro electromagnético visible. Las características de los LEDs empleados se describen en la **Tabla 3.1**.

**Tabla 3.1.** Parámetros de los LEDs empleados como fuente de radiación monocromática.

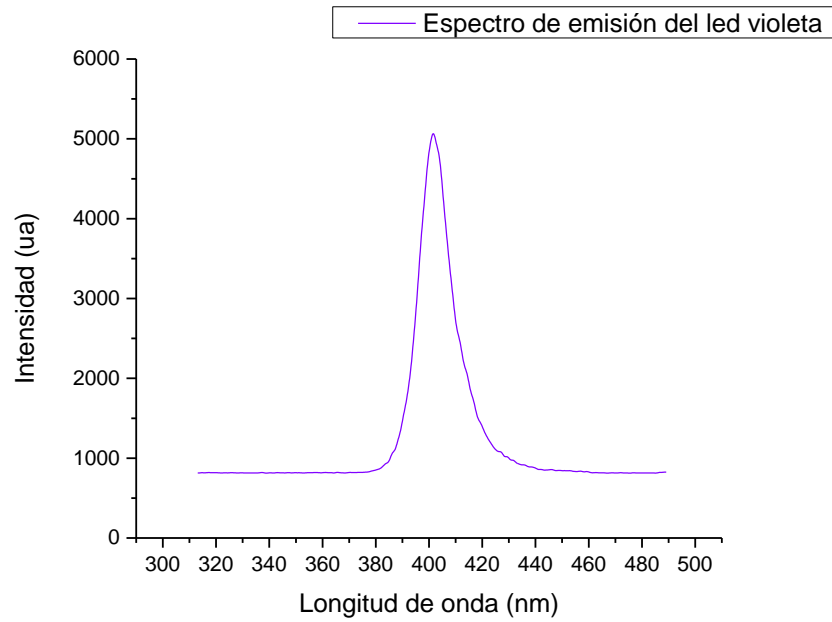
Longitud de onda (nm)	Color	Voltaje (V)	Intensidad de corriente ( mA)	Diámetro (mm)
<b>591</b>	Amarillo	2.1	20	5
<b>467</b>	Azul	3.6	20	5
<b>637</b>	Rojo	2.0	20	5
<b>529</b>	Verde	2.1	20	5
<b>401</b>	Violeta	3.8	20	5
<b>380 - 700</b>	Blanco	3.6	20	5

Los valores de longitud de onda para cada uno de los LEDs se obtuvieron experimentalmente mediante un montaje que consistió en una base para los LEDs, una fibra óptica de 400  $\mu\text{m}$  de diámetro del núcleo (Ocean Optics) , el espectrómetro (tipo Czerny-Turner Andor Technology, Shamrock SR-500i) con un ancho de rendija de 10  $\mu\text{m}$  configurado con una rejilla de difracción de 1200 (*grooves/mm*), *grating blaze: 500*.

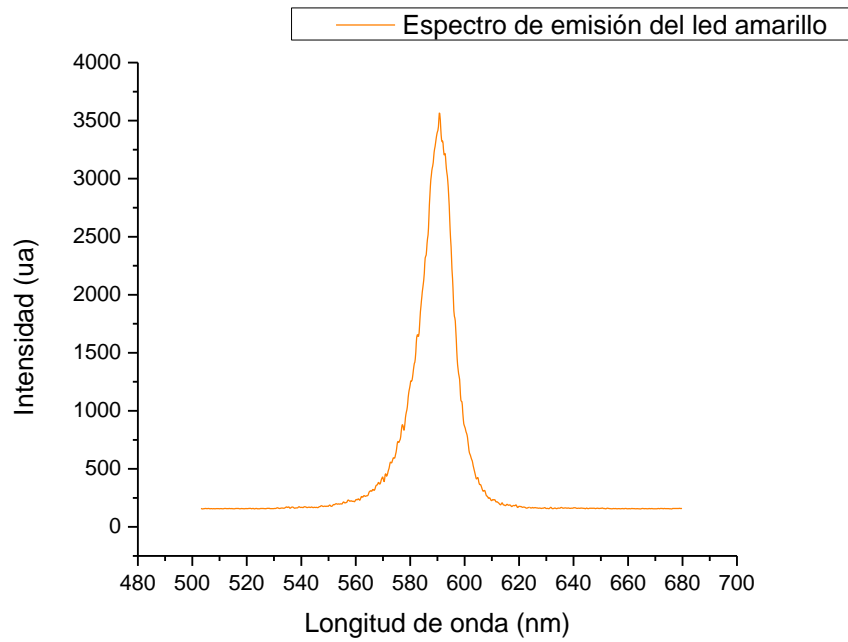
El espectrómetro está provisto de un detector cámara tipo *intensified charge-coupled device* (ICCD); Andor Technology, iStar DH-720, cuya temperatura de trabajo fue de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La adquisición de datos se realizó mediante el software Andor SOLIS (T) Software Packages (Andor Technology). Con un modo de adquisición de cinco acumulaciones. El Modo de disparo Externo o activación manual mediante *Q-Switch single shot*, con un tiempo de exposición de 0.017 s.

A partir de este montaje se obtuvieron los espectros para cada uno de los LEDs empleados los cuales se ilustran en las **Figuras 3.2.** a la **3.6.**

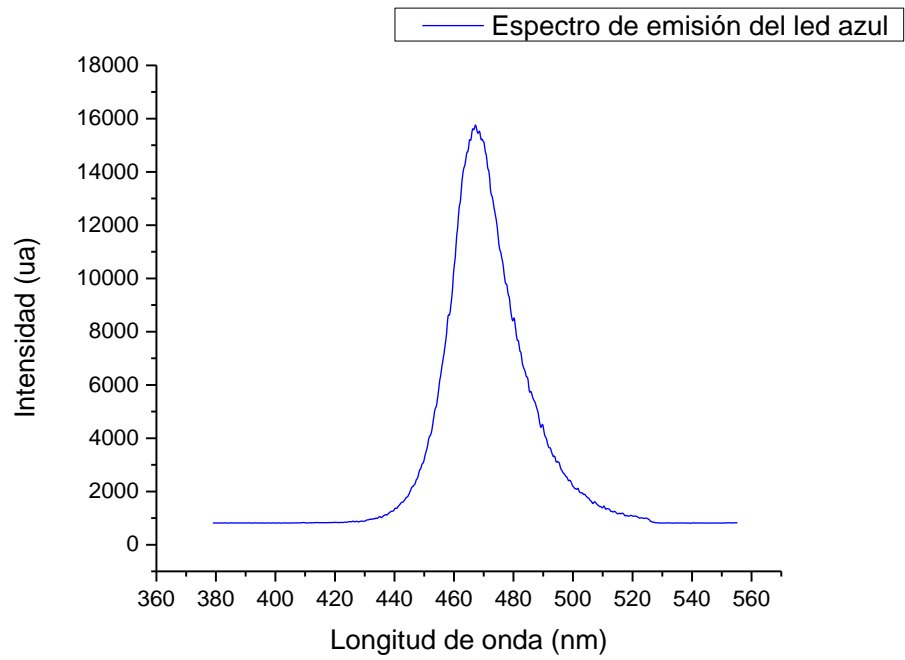
**Figura 3.2.** Espectro de emisión del LED violeta.



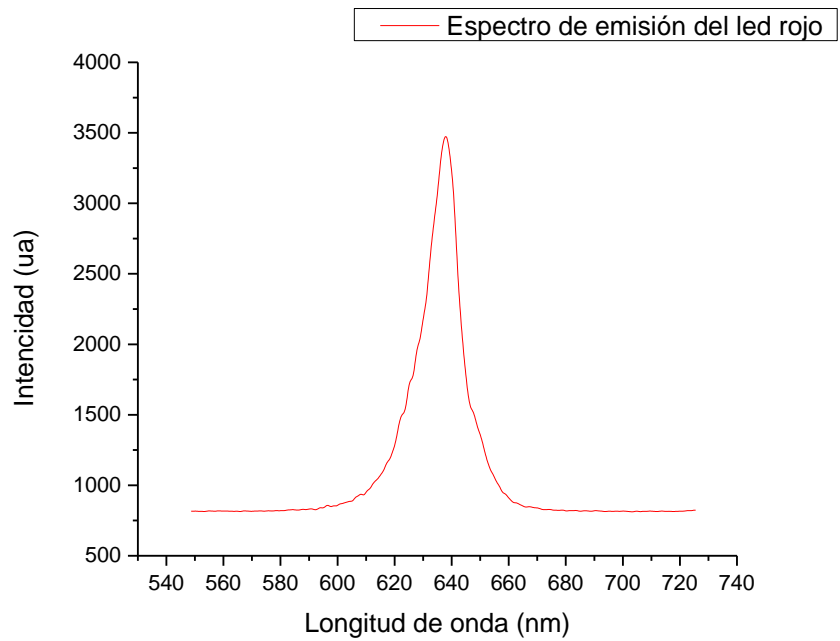
**Figura 3.3.** Espectro de emisión del LED amarillo



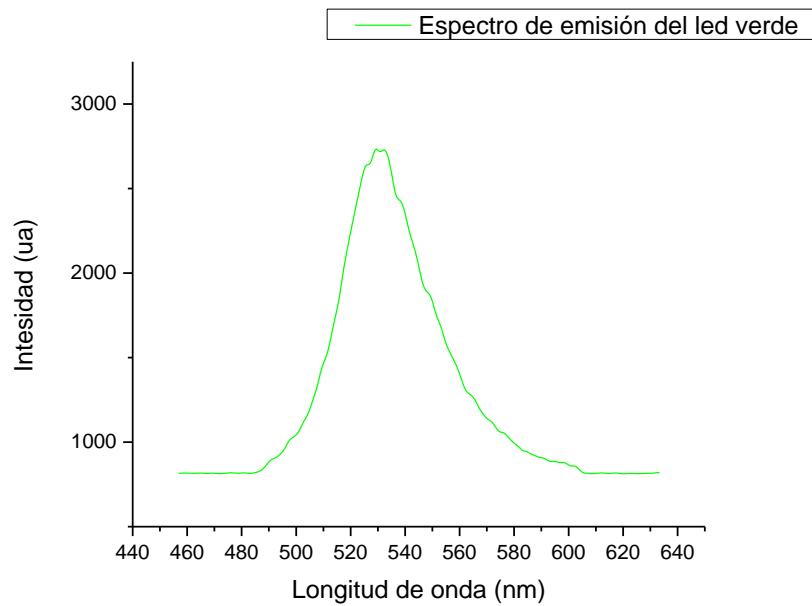
**Figura 3.4.** Espectro de emisión del LED azul



**Figura 3.5.** Espectro de emisión del LED rojo



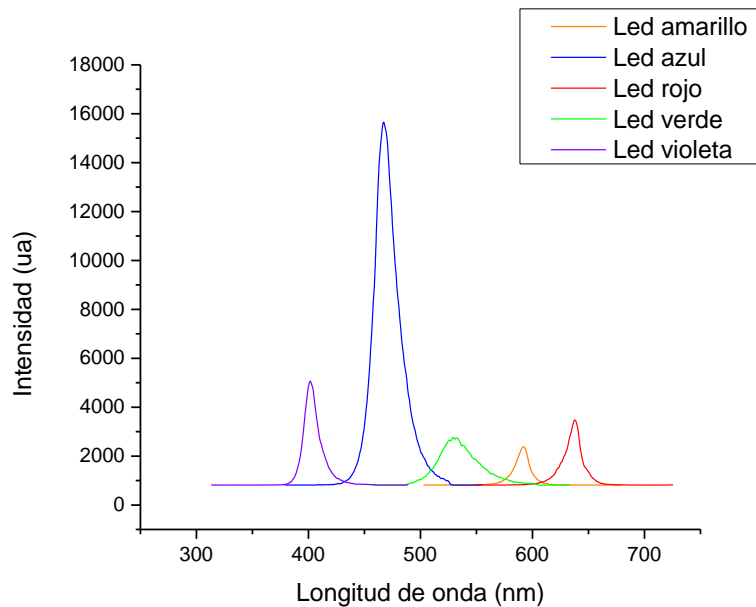
**Figura 3.6.** Espectro de emisión del LED verde



En cada una de las anteriores figuras se puede observar una banda relativamente estrecha lo cual muestra el carácter monocromático de la radiación emitida por cada uno de los LEDs. Los valores de longitud de onda asignados a estos dispositivos en la **Tabla 3.1** se obtuvieron a partir de los máximos de emisión en cada uno de sus respectivos espectros.

En la **Figura 3.7.** se puede apreciar la superposición de los espectros de todos los LEDs. A simple vista se observa una diferencia considerable en las intensidades de cada una de las bandas, lo cual era de esperarse debido a que cada uno ellos emiten luz con diferente intensidad, siendo el LED de color azul el más intenso lo cual se puede visualizar gráficamente. Cabe señalar que el voltaje de alimentación fue el mismo para todos los LEDs al momento de la toma de espectros. Otra observación importante de la **Figura 3.7.** es que en ella se aprecia una cobertura casi completa del espectro visible por parte de la fuente de radiación del colorímetro.

**Figura 3.7.** Superposición de los espectros de todos los LEDs usados como fuente de radiación en el colorímetro



Atendiendo a que en espectroscopia es necesario garantizar siempre el mismo camino óptico para la luz, es decir la distancia entre fuente-muestra y muestra-detector debe permanecer invariable, se unificó en una pieza el sistema fuente de radiación-portamuestra-detector como se puede apreciar en la **Figura 3.8**. En esta se puede visualizar un cilindro de PVC con 6 pares de perforaciones paralelas en las que posteriormente fueron acoplados cada uno de los 6 pares LED-LDR, es decir fuente de radiación puntual monocromática y su correspondiente detector.

**Figura 3.8.** Fuente de radiación construida a partir de un arreglo de LEDs y acople de estos al portamuestras.



### 3.1.3. Portamuestra

Su diseño y construcción se fundamentó en que fuese un sistema fijo y robusto para de esta manera poder garantizar las mismas distancias en la óptica del equipo. Como ya se mencionó en el apartado correspondiente a fuente de radiación, **3.1.2.**, el portamuestra consta de un cilindro hueco de PVC de color blanco, con una altura de 8.0 cm, un diámetro interno de 1.6 cm y externo de 2.7 cm. A lo largo de su longitud, se realizaron seis pares de perforaciones paralelas distribuidas uniformemente con una distancia de un centímetro entre ellas. Adicionalmente, se realizó otro orificio perpendicular a una de las parejas de perforaciones. El diámetro las perforaciones fue de 5 mm.

A partir de este diseño se buscó tener un sistema fuente–detector individual para cada longitud de onda, garantizándose aún más la uniformidad del camino óptico debido a que no hay ninguna pieza móvil en el montaje. Para ello se dispuso del arreglo de LEDs en una de las filas de orificios del cilindro y la fila opuesta fue destinada para las fotorresistencias. Mediante esta disposición se garantiza que la luz emitida por el LED incida de manera perpendicular a su fotorresistencia asociada. En la **Figura 3.9** se puede apreciar el portamuestra con sus respectivas

perforaciones, además de la configuración fuente-detector anteriormente mencionada

**Figura 3.9.** Portamuestras construido a partir de un cilindro hueco de PVC.



La celda para este colorímetro se basó en un tubo de ensayo en vidrio borosilicato, cortado a 7.5 cm el cual encaja de manera precisa en el porta muestra, debido a que su diámetro es de 1.6 cm. La tapa del tubo de ensayo sella ópticamente el sistema evitando así que la radiación electromagnética del ambiente ingrese a los detectores, y a su vez esta sirve de referencia para el posicionamiento de la celda. **La figura 3.10.** muestra la celda descrita anteriormente.

**Figura 3.10.** Celda empleada en el colorímetro.



### 3.1.4. Detectores

Se emplearon siete fotorresistencias de sulfuro de cadmio GL5528CdS photoconductive cells, para un rango de 400 a 800 nm. Entre sus rasgos principales destacan una alta sensibilidad debido a que presenta un amplio espectro de valores de resistencia, un tiempo de respuesta relativamente corto, entre otros como se muestra en la **Tabla 3.2.**

**Tabla 3.2.** Características principales de las fotorresistencias empleadas como detectores.

Tipo	Diámetro (mm)	Voltaje máximo (V)	Potencia máxima (mW)	Temperatura de trabajo (°C)	Resistencia con iluminación (10 Lux) (KΩ)	Resistencia en la oscuridad (MΩ)	Tiempo de respuesta (ms)
GL5528	5	150	100	-30 ~ +70	8 ~20	1	30

La disposición de las fotorresistencias en el sistema radiación-portamuestra-detector se configuro de manera análoga a los LEDs, puesto que se buscó tener un sistema individual LED-LDR para cada una de las longitudes de onda. El arreglo de LEDs-LDR puede verse en la **Figura 3.9.**

Posterior al montaje de los LDR sobre el portamuestra, se configuro uno de sus terminales a un nodo común a fin de facilitar la conexión con el circuito conversor.

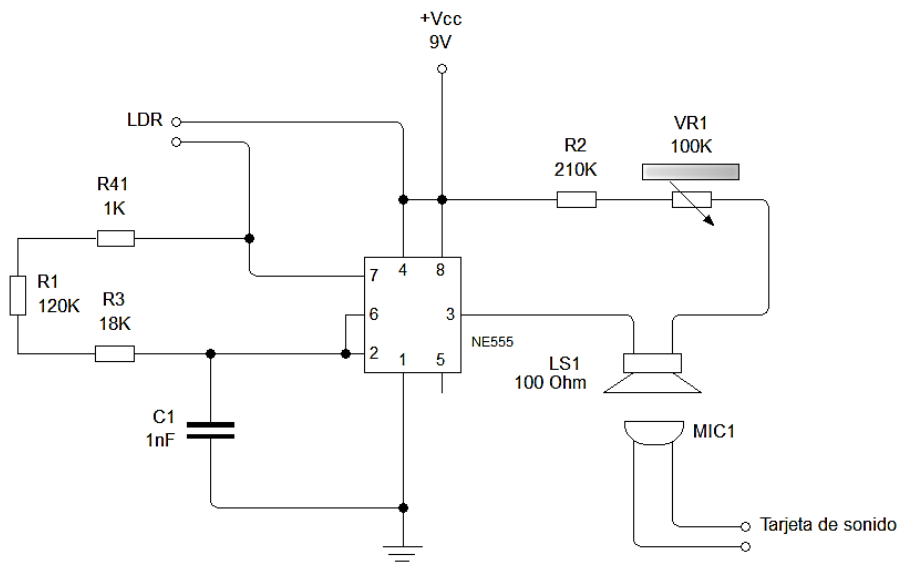
### 3.1.5. Sistema de registro

El circuito se puede dividir en varias fases, que cumplen con diferentes funciones. Está compuesto por un circuito electrónico que se encarga de recibir la señal que proviene de los detectores y la transforma a una señal sonora, una interfaz que toma esta señal y la transforma nuevamente a una señal eléctrica acoplado el circuito electrónico con la tarjeta de sonido del computador de una forma segura debido a

que aísla eléctricamente los dos sistemas. Y finalmente el computador, el cual registra y procesa la señal mediante un software.

El circuito electrónico mencionado anteriormente como circuito conversor, está basado en un C.I. 555 configurado en modo astable como se ilustra en la **Figura 3.11**. Se empleó un condensador de 1 nF y tres resistencias de 1K, 18K y 120K Ohm. En conjunto con el LDR conforman el circuito RC, que configura la frecuencia en la señal de salida del 555.

**Figura 3.11.** Diagrama electrónico esquemático de la configuración en modo astable del circuito integrado 555.



El diseño el circuito impreso se obtuvo a partir del diagrama electrónico mostrado en la **Figura 3.11**. mediante el software PCB Wizard. **(Anexo)**

Para ajustar el nivel de intensidad de la señal emitida por el 555 se utilizó una resistencia conectada en paralelo a un potenciómetro de 210 y 100 K Ohm

respectivamente. Este sistema se completó conectando un altavoz con impedancia de 100 Ohm, el cual transforma los pulsos eléctricos provenientes del circuito en una señal acústica.

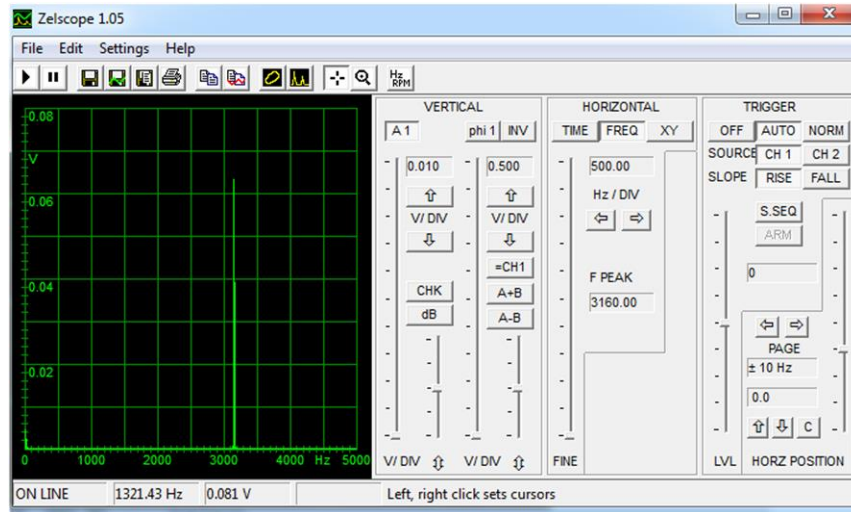
La interfaz se construyó a partir de un micrófono de condensador electret, conectado a un cable blindado el cual a la vez se soldó a un conector para audio de 3.5 mm, que tiene como función enlazar el circuito con la entrada de micrófono de la tarjeta de sonido del computador. Esta interfaz se aisló acústicamente del ambiente encapsulando el sistema parlante-micrófono dentro de un cilindro cerrado de PVC, el cual se ilustra en la **Figura 3.12.**

**Figura 3.12.** Interfaz blindada acústicamente mediante un cilindro PVC



La función del computador consiste en recibir la información proveniente del colorímetro a través de la tarjeta de sonido y posteriormente procesarla a partir de un software simulador de un osciloscopio (Zelescope 1.05), el cual mediante la transformada de Fourier convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia; permitiendo establecer su valor de frecuencia, asociándose así los cambios en la frecuencia de la señal con los cambios en la transmitancia.

**Figura 3.13.** Software Zelescope 1.05

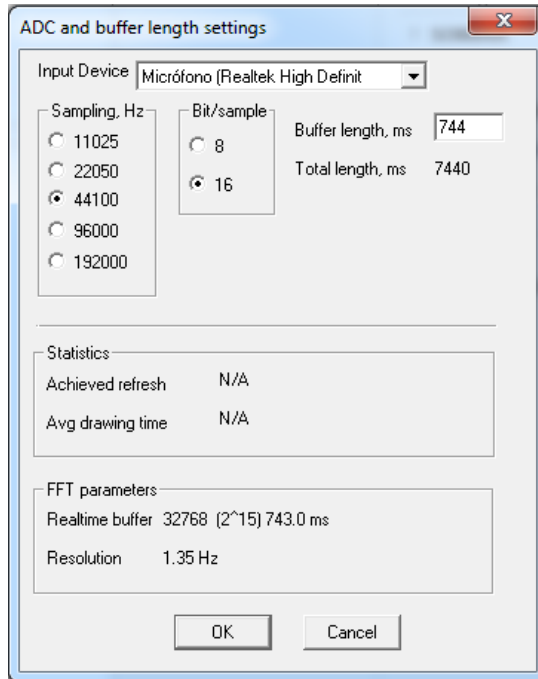


En la figura anterior se muestra la presentación en modo ventana del programa Zelescope. De este se puede destacar que muestra gráficamente la señal con sus componentes de frecuencia, además de los valores numéricos de las frecuencias pico, denotadas como F PEAK.

Es importante mencionar que se debe realizar un ajuste a la resolución del software, debido a que cada vez que se ejecuta el programa está por defecto en un valor bajo (21.53 Hz). El cambio de la resolución del programa se hace desplegando el menú Settings/ADC and buffer length settings y modificando el valor de tiempo de la longitud del buffer (buffer length, ms), alcanzándose el valor máximo de resolución (1.35 Hz) con el valor buffer de 744 ms.

En la **Figura 3.14.** se muestra la configuración del programa para obtener la máxima resolución mencionada, de esta forma se maximiza la sensibilidad del equipo puesto que pueden detectarse variaciones en frecuencia de la señal de orden de 1.35 Hz.

**Figura 3.14.** Ventana de configuración de resolución y frecuencia de muestreo de programa



En la **Figura 3.15.** se muestra el prototipo final del colorímetro, se pueden distinguir sus controles, celda para la muestra y el interfaz de conexión al computador mediante el puertos USB.

**Figura 3.15.** Imagen del prototipo final del colorímetro.



### 3.2. FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO COMPLETO.

Al unificarse las partes descritas anteriormente se obtuvo el circuito ilustrado en la **Figura 3.16**. En el que se describen las conexiones y disposición de todos los componentes utilizados para llevar a cabo la construcción del colorímetro.

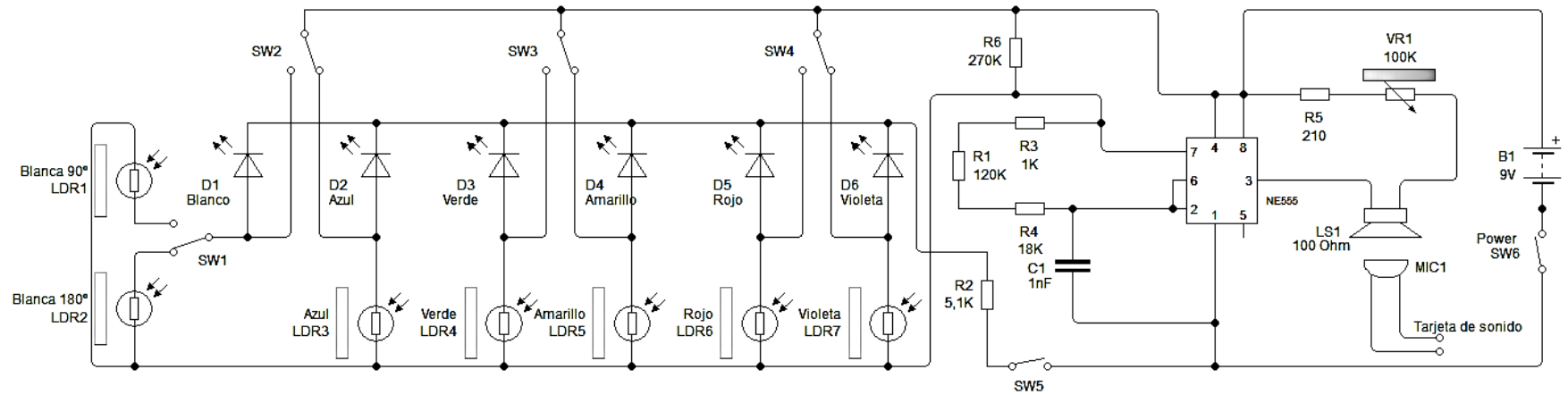
El funcionamiento de la parte electrónica del equipo se puede entender fácilmente explicando lo que sucede en el circuito al generarse un cambio en las concentraciones del analito, la fuente de radiación (LED2-LED6) emite luz de longitud de onda característica para cada LED, la luz atraviesa la celda que contiene el analito disuelto generándose el fenómeno de absorción, esto conlleva a una disminución en la intensidad de la luz que llega los detectores (LDR3-LDR7) cada uno de los cuales es posible accionar individualmente junto con su respectiva fuente de radiación asociada, mediante los interruptores de doble posición (SW2, SW3 y SW4). Como se describió previamente en la parte teórica, la fotorresistencia es un componente electrónico cuya resistencia varía en función de la intensidad de la luz. En este caso si se da una disminución en la intensidad de la luz, el LDR asume un valor de resistencia mayor, modificándose así el valor de la frecuencia en la señal emitida por el circuito integrado 555, ya que esta depende tanto del valor del condensador (C1) como de las resistencias (R1, R3, R4 y LDR) como se logra apreciar en la **Ecuación 1.13**. Expresado de otra manera, si se da una disminución en la intensidad de la luz producto de la absorción, el transductor fotosensible la traducirá a un incremento en su resistencia cuyo incremento será traducido a la vez en una disminución en la señal de la frecuencia emitida por el circuito integrado.

La intensidad de la señal emitida por el 555 es limitada por el potenciómetro (R5 y VR1) y finalmente es transformada en una señal acústica mediante un transductor electroacústica o parlante (LS1).

Las ondas de presión emitidas por el parlante, son captadas por el micrófono el cual realiza el trabajo inverso al del parlante, es decir transforma la señal acústica en una señal eléctrica, la cual es conducida a través del cable blindado y es introducida al computador mediante el puerto de micrófono con ayuda del conector de 3.5 mm. Esta configuración parlante-micrófono tuvo como objetivo aislar eléctricamente el colorímetro del computador, en caso de que se presentaran fallas que comprometieran la integridad de la PC.

En el diseño y construcción del colorímetro también fue incluido un detector (LDR1) ubicado de forma ortogonal y otro (LDR2) de manera paralela a la fuente de radiación de luz blanca (D1) controlada por una de las posiciones de SW2. Los dos LDR mencionados son accionados por el interruptor de doble posición SW1 como puede verse en la **Figura 3.16.**, estos dos detectores fueron dispuestos para ampliar la aplicación del equipo a determinaciones nefelométricas y de transmitancia de luz blanca respectivamente.

Figura 3.16. Circuito electrónico general del colorímetro.



### 3.3. FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO

La secuencia operativa del instrumento es la siguiente:

#### 3.3.1. Conexión del equipo al computador

Lo primero que se debe hacer antes del uso del equipo, es efectuar la conexión de este con el computador lo cual se hace mediante el conector de 3.5 mm que sobresale del equipo, el cual se inserta en el puerto de micrófono de la tarjeta de sonido del computador. Otro tipo de conexión posible con el computador es mediante el puerto de USB, lo cual se logra empleando una tarjeta de sonido USB externa 3D SOUND siendo esta un dispositivo Plug-and-play que digitaliza la señal analógica proveniente del colorímetro, permitiendo así una rápida conexión con cualquier computador mediante su puerto USB.

Los dos tipos de conexión mencionados anteriormente se pueden ver en la **Figura 3.17.**, en la parte b) de esta se puede notar una luz indicadora roja en el dispositivo Plu-and-play, esta luz se hace intermitente a partir de momento en el que el programa Zelescope comienza con la adquisición de datos provenientes del colorímetro.

**Figura 3.17.** Tipos de conexiones permitidas por el equipo, a) mediante la tarjeta de sonido interna del computador y b) por medio de puerto USB.



### 3.3.2. Encendido y estabilización del colorímetro

El funcionamiento del colorímetro construido, es similar al de cualquier otro equipo comercial. Antes de utilizar el equipo para realizar las respectivas mediciones, es necesario esperar durante un tiempo de 2 a 3 minutos posterior al encendido, para que de esta forma los componentes del equipo, principalmente los detectores puedan estabilizarse.

### 3.3.3. Ajuste de la celda en el portamuestra

La muestra debe colocarse dentro de la celda garantizando que el nivel de llenado esté por encima del nivel del haz de luz emitido por la fuente de radiación escogida para la medición. Se ajusta la posición de la celda con ayuda de la guía que está impresa en la tapa de la celda y el cuerpo del colorímetro como se puede observar en la **Figura 3.18**, buscando que estén alineadas para garantizar siempre el mismo camino óptico en la celda.

**Figura 3.18.** Ajuste de la celda respecto al colorímetro.



### **3.3.4. Ajuste del Cero Instrumental**

Como es un instrumento de un solo haz, el ajuste consiste en compensar cualquier desequilibrio presente en la radiación detectada por las fotorresistencias (LDR1-LDR7) lo cual se hace midiendo la señal generada por el blanco y asignándosele a esta el 100% de transmitancia. Para la medición de la señal que corresponde a 0% de transmitancia se apaga la fuente de radiación mediante el interruptor SW5 según el diagrama del circuito mostrado en la **Figura 3.16.**, siendo este mismo interruptor el etiquetado en la carcasa del equipo como Fuente. De esta forma se simula una absorción del 100% de la radiación, es decir una transmitancia del 0%; pudiéndose construir a partir de estos dos valores una escala de porcentaje de transmitancia.

### **3.3.5. Incidencia de radiación sobre la muestra**

En esta etapa se efectúa la incidencia del haz de radiación sobre la muestra y el detector. Esto se logra seleccionando la longitud de onda que se va a utilizar, mediante los interruptores etiquetados con los respectivos colores y valores de longitud de onda de cada fuente de luz y con el posterior encendido de la fuente de radiación posicionando en ON el interruptor Fuente, el cual se puede apreciar en la **Figura 3.19.** en donde se aprecian los controles del colorímetro.

**Figura 3.19.** Fotografía de la cara frontal del colorímetro.



La muestra objeto de la medición se introduce en el soporte del portamuestra tal como se describió en el apartado **3.3.2.**, al ser colocada la muestra, esta queda fija en el camino óptico del haz de radiación y su detector correspondiente.

### **3.3.6. Detección de radiación absorbida**

Para realizar la medición, fueron utilizados los transductores LDR acoplados al circuito integrado y la interfaz micrófono-parlante que en conjunto convierten las variaciones de la intensidad de la radiación en una señal eléctrica analógica de frecuencia variable.

### **3.3.7. Digitalización y muestreo del resultado obtenido**

En esta etapa se hace uso de la tarjeta de sonido del PC, esta posee una serie de características y funcionalidades que la hacen idónea para las tareas requeridas en esta fase, como lo son la conversión analógico-digital de la señal de entrada que

será cuantificada y el procesamiento matemático de la misma, el cual es realizado por el software Zelescope con el objetivo de dar el resultado requerido, la lectura del valor de la frecuencia de la señal.

En esta parte es importante mencionar la relación directa que existe entre la frecuencia de la señal y la concentración de la muestra que se está midiendo. A partir del ajuste a cero del equipo en el cual se obtienen los valores de frecuencia para 0% y 100% de transmitancia, fue posible construir una escala que relacionara de manera directa los valores de frecuencia con los de transmitancia para así calcular la absorbancia y a partir de esto poder construir curvas de calibración de concentración vs absorbancia.

### **3.4. PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO**

Una vez finalizada la construcción del equipo, se procedió a realizar pruebas preliminares con el fin de determinar si existía una respuesta de este a los cambios de concentración, lo cual arrojó un resultado positivo (**Anexo**). A partir de las pruebas preliminares también fue posible determinar los intervalos de concentración en los que el equipo responde para cada longitud de onda.

Para la realización de estas pruebas, así como para las consecutivas, fueron empleadas diluciones de cinco compuestos diferentes los cuales se presentan en la **Tabla 3.3**. En esta también se pueden identificar los dos parámetros con los que se seleccionaron, solubilidad y color, para poder garantizar que a partir de estos se pudiesen obtener disoluciones y además que absorbieran la luz proveniente de las fuentes de radiación.

**Tabla 3.3.** Compuestos empleados para la calibración del colorímetro.

Nombre del compuesto	Formula molecular	Color en solución acuosa	Solubilidad en agua (g/L a 20°C)	Masa molecular (g/Mol)
<b>Azul de metileno</b>	$C_{16}H_{18}ClN_3S$	azul	40	319.85
<b>Amarillo de titanio</b>	$C_{28}H_{19}N_5Na_2O_6S_4$	amarillo	29	695.70
<b>Rodamina B</b>	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$	violeta	34	479.02
<b>Verde brillante</b>	$C_{27}H_{34}N_2O_4S$	verde	100	482.64
<b>Fluoresceína</b>	$C_{20}H_{12}O_5$	verde pálido	0.3	332.30

A cada una de las cinco fuentes de radiación monocromática (LEDs) le fue asignado uno de los compuestos mencionados según la **Tabla 3.4.**

**Tabla 3.4.** Asignación de compuestos a cada fuente de luz junto con su respectiva longitud de onda de máxima intensidad.

Compuesto	Fuente de luz	Longitud de onda
<b>Azul de metileno</b>	Amarilla	591
<b>Amarillo de titanio</b>	Azul	467
<b>Rodamina B</b>	Verde	529
<b>Verde brillante</b>	Roja	637
<b>Fluoresceína</b>	Violeta	401

Para la asignación descrita en la tabla anterior se tomó como criterio el hecho de que cada compuesto presentara fuerte absorción en la longitud de onda emitida por su respectiva fuente de luz.

Así mismo se realizó una comparación de la linealidad y sensibilidad del equipo tomando como referencia las medidas obtenidas a partir de las soluciones de referencia, mediante un espectrofotómetro UV-Vis marca Shimadzu UV-2401PC UV-Visible Spectrophotometer, con fuente de radiación de doble haz, dotado del

cabezal correspondiente para absorbancia. Para esta comparación se eligió la longitud de onda de 591 nm, correspondiente a la fuente de luz amarilla del colorímetro y se fijó este valor en el espectrofotómetro comercial para las mediciones de absorbancia.

### **3.5. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE REFERENCIA**

A partir de las pruebas preliminares (**Anexos**) se determinó el rango de concentraciones a las que el equipo responde mostrando variaciones en la señal generada. Las soluciones acuosas de referencia se prepararon a partir de los compuestos enunciados en la **Tabla 3.4.** (ACS reagent grade, Merck KGaA, Darmstadt, Germany) y agua destilada. Para medir las masas de los reactivos se utilizó una balanza electrónica analítica (Sartorius Cubis® Analytical; MSA224S-000-DU, legibilidad: 0,1 [mg]) y para preparar las soluciones se usaron cinco matraces aforado Tipo B (Schott-Duran; 100 mL, límite de exactitud  $\pm 0.2$  mL) y un matraz aforado Tipo B (Schott-Duran; 10 mL, límite de exactitud  $\pm 0.08$  mL).

Inicialmente se preparó una solución de 100 mg/L de cada compuesto a partir de las cuales se realizaron las diferentes diluciones que se presentan en las respectivas tablas.

#### **3.5.1. Azul de metileno (luz amarilla $\lambda=591$ nm)**

Las **Tablas 3.5 a 3.9.** muestran los diferentes puntos de concentración para la construcción del modelo de calibración. Estas soluciones también fueron medidas en el espectrofotómetro comercial a fin de comparar la linealidad y sensibilidad entre este y el colorímetro construido.

**Tabla 3.5.** Puntos de concentración para calibración de la luz amarilla.

Punto	Concentración (mg/L)
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30

Los puntos de concentración expresados en de la **Tabla 3.6.** se emplearon para mostrar la linealidad en el sistema de luz amarilla.

**Tabla 3.6.** Puntos de concentración del azul de metileno para la determinación de la linealidad de luz amarilla.

Punto	Concentración (mg/L)
1	0,5
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,5
6	3,0
7	3,5
8	4,0
9	4,5
10	5,0
11	5,5
12	6,0
13	6,5
14	7,0
15	7,5
16	8,0
17	8,5
18	9,0
19	9,5
20	10,0

En la **Tabla 3.7.** se redujo el intervalo en los puntos de concentración de las disoluciones con el fin de buscar la sensibilidad del equipo.

**Tabla 3.7.** Exploración inicial de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de 0.05 mg/L.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0,00
2	0,05
3	0,10
4	0,15
5	0,20

<b>6</b>	0,25
<b>7</b>	0,30
<b>8</b>	0,35
<b>9</b>	0,40
<b>10</b>	0,45
<b>11</b>	0,50

En la **Tabla 3.8.** se muestra la exploración intermedia de la sensibilidad del equipo empleando un intervalo de concentración menor al anterior.

**Tabla 3.8.** Segunda exploración de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de 0.01.

Puntos	Concentración (mg/L)
<b>1</b>	0,00
<b>2</b>	0,01
<b>3</b>	0,02
<b>4</b>	0,03
<b>5</b>	0,04
<b>6</b>	0,05
<b>7</b>	0,06
<b>8</b>	0,07
<b>9</b>	0,08
<b>10</b>	0,09
<b>11</b>	0,10

En la **Tabla 3.9.** se muestra la exploración final para la determinación de la sensibilidad del equipo, empleándose el anterior intervalo de concentración reducido a la mitad.

**Tabla 3.9.** Exploración final de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de 0.005.

Puntos	Concentración (mg/L)
<b>1</b>	0.00
<b>2</b>	0,005

3	0,010
4	0,015
5	0,020
6	0,025
7	0,030
8	0,035
9	0,040
10	0,045
11	0,050

### 3.5.2. Amarillo de titanio (luz azul $\lambda=467$ nm)

El intervalo de concentración de las soluciones de referencia para el amarillo de titanio se muestra en la **Tabla 3.10**.

**Tabla 3.10.** Puntos de concentración para calibración de la luz azul.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	55
13	60
14	65
15	70
16	75
17	80
18	85

19	90
20	95
21	100
22	105
23	110
24	115
25	120

Los puntos de concentración expresados en de la **Tabla 3.11.** se emplearon para mostrar la linealidad del sistema de luz azul.

**Tabla 3.11.** Puntos de concentración del azul de metileno para la determinación de la linealidad en la fuente de luz azul.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	55

### 3.5.3. Verde brillante (luz roja $\lambda=637$ nm)

La **Tabla 3.12.** detalla el número de soluciones preparadas y sus concentraciones para el compuesto verde brillante.

**Tabla 3.12.** Puntos de concentración para calibración de la luz roja.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10
7	12
8	14
9	16
10	18
11	20
12	22
13	24
14	26
15	28
16	30
17	32
18	34
19	36
20	38
21	40
22	42
23	44
24	46
25	48
26	50
27	52
28	54
29	56
30	58
31	60

Los puntos de concentración expresados en de la **Tabla 3.13.** se emplearon para mostrar la linealidad de la fuente de luz roja.

**Tabla 3.13.** Puntos de concentración del verde brillante para la determinación de la linealidad del sistema de luz roja.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0,0
2	0,5
3	1,0
4	1,5
5	2,0
6	2,5
7	3,0
8	3,5
9	4,0
10	4,5
11	5,0
12	5,5
13	6,0
14	6,5
15	7,0
16	7,5
17	8,0
18	8,5
19	9,0
20	9,5
21	10,0

#### 3.5.4. Rodamina B (luz verde $\lambda=529$ nm)

La **Tabla 3.14** muestra el rango de concentraciones para la rodamina B.

**Tabla 3.14.** Puntos de concentración para calibración de la luz verde.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0
2	2
3	4

4	6
5	8
6	10
7	12
8	14
9	16
10	18
11	20
12	22
13	24
14	26
15	28
16	30
17	32
18	34
19	36
20	38
21	40
22	42
23	44
24	46
25	48
26	50

Los puntos de concentración expresados en de la **Tabla 3.15**. se emplearon para mostrar la linealidad del sistema asociado a la luz verde.

**Tabla 3.15.** Puntos de concentración de la rodamina B para la determinación de la linealidad en la luz verde.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0,0
2	0,5
3	1,0
4	1,5
5	2,0

6	2,5
7	3,0
8	3,5
9	4,0
10	4,5
11	5,0
12	5,5
13	6,0
14	6,5
15	7,0
16	7,5
17	8,0

### 3.5.5. Fluoresceína (luz violeta $\lambda=401$ nm)

La **Tabla 3.16** muestra el rango de concentraciones para la fluoresceína

**Tabla 3.16.** Puntos de concentración para calibración de luz violeta.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10
7	12
8	14
9	16
10	18
11	20
12	22
13	24
14	26
15	28
16	30

17	32
18	34
19	36
20	38
21	40
22	42
23	44
24	46
25	48
26	50

Los puntos de concentración expresados en de la **Tabla 3.17.** se emplearon para mostrar la linealidad del sistema de luz violeta.

**Tabla 3.17.** Puntos de concentración de la fluoresceína para la determinación de la linealidad en el color violeta.

Puntos	Concentración (mg/L)
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10
7	12
8	14
9	16
10	18

### 3.6. ANÁLISIS DE DATOS

Las señales o datos adquiridos consistieron en el conjunto de valores de frecuencia recolectados con el software Zelescope. Los datos generados a partir de cada

medición son valores de frecuencia en Hz. Sin embargo, la conversión de estos valores de frecuencia a porcentajes de transmitancia se realizó mediante hojas de cálculo de Excel, teniendo en cuenta los valores de frecuencia correspondientes a 0% y 100% de transmitancia como se mencionó en el apartado **3.3.4.** correspondiente al ajuste del cero instrumenta, empleando la **Ecuación 1.15.**

**Ecuación 1.15.**

$$\%T = \frac{F_{medición} - F_{blanco}}{F_{blanco} - F_{sin\ luz}} * 100$$

donde  $F_{medición}$  es la frecuencia para cada una de las mediciones arrojadas por las diferentes diluciones,  $F_{blanco}$  corresponde a la frecuencia medida para el blanco, y  $F_{sin\ luz}$  es el valor de la frecuencia cuando el interruptor fuente está en la posición OFF, es decir la fuente de luz está apagada.

Posteriormente, a partir de los valores de transmitancia y sus correspondientes concentraciones se realizaron gráficas para determinar inicialmente el comportamiento del equipo dentro de estos rangos de concentración para cada una de las cinco longitudes de onda con las que trabaja el equipo.

A su vez se escogieron rangos de concentración para cada longitud de onda con el fin determinar el comportamiento lineal del equipo dentro de ellos, esto se logró mediante la elaboración de regresiones lineales simples por mínimos cuadrados para cada una de las longitudes de onda y de esta manera, poder determinar el grado de linealidad del equipo.

Finalmente, para la determinación de la sensibilidad se seleccionó la longitud de onda de 591 nm que corresponde a la fuente de luz amarilla. Para esto, se realizaron tres exploraciones variando el intervalo de concentración en cada una de ellas. En

la primera, se empleó un intervalo de concentración de 0.05 mg/L, en la segunda un intervalo de concentración de 0.01 mg/L y en la última exploración el intervalo fue de 0.005 mg/L. Estas mediciones fueron realizadas de manera análoga mediante un espectrofotómetro comercial, con el fin de comparar los resultados obtenidos y de esta manera tener una referencia para evaluar la calidad del equipo.

## 4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir del respectivo análisis, se dividieron en dos partes. La primera corresponde a la evaluación de la respuesta y linealidad de cada una de las diferentes longitudes de onda que ofrece el equipo para rangos de concentración amplios. Y a su vez, la segunda parte corresponde a los resultados de la determinación de sensibilidad y linealidad del equipo en rangos de concentración bajos, empleando únicamente la longitud de onda correspondiente al color amarillo.

### 4.1. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA Y LINEALIDAD DEL EQUIPO

A partir de los resultados obtenidos mediante las pruebas preliminares se asignaron rangos de concentración dentro de los cuales se midió la transmitancia para cada uno de los puntos y esto repitió para cada una de las longitudes de onda del equipo; los valores obtenidos se observan en las **Figuras 4.1., 4.4., 4.6., 4.8. y 4.10.**, posteriormente, se llevó a cabo una comparación grafica de la respuesta en porcentaje de transmitancia entre el equipo construido y un espectrofotómetro comercial, empleando la longitud de onda de 591 nm, **Figura 4.3..**

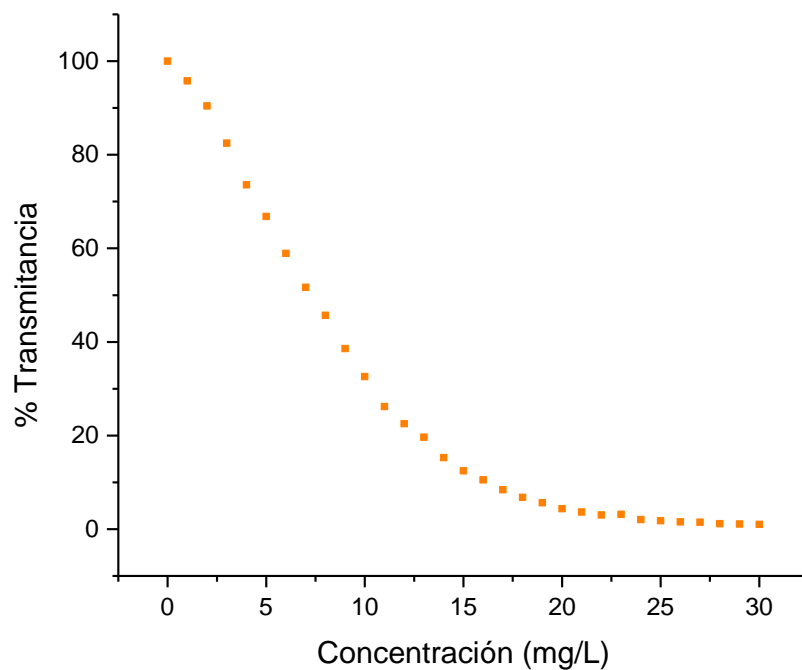
Además de lo anterior se determinó la linealidad del equipo para cada una de las longitudes de onda, dentro de unos intervalos de concentración específicos, presentándose estos resultados en las **Figuras 4.2., 4.5., 4.7., 4.9 y 4.11.**

#### 4.1.1. Azul de metileno (luz amarilla $\lambda=591$ nm)

**Tabla 4.1.** Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones del azul de metileno, utilizando la fuente de luz amarilla.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia
1	0	100,00
2	1	95,79
3	2	90,41
4	3	82,46
5	4	73,58
6	5	66,80
7	6	58,92
8	7	51,68
9	8	45,67
10	9	38,58
11	10	32,58
12	11	26,19
13	12	22,53
14	13	19,64
15	14	15,28
16	15	12,47
17	16	10,52
18	17	8,42
19	18	6,78
20	19	5,61
21	20	4,36
22	21	3,66
23	22	3,04
24	23	3,15
25	24	2,03
26	25	1,79
27	26	1,56
28	27	1,48
29	28	1,17
30	29	1,09
31	30	1,01

**Figura 4.1.** Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta. de  $\lambda=591$  nm.

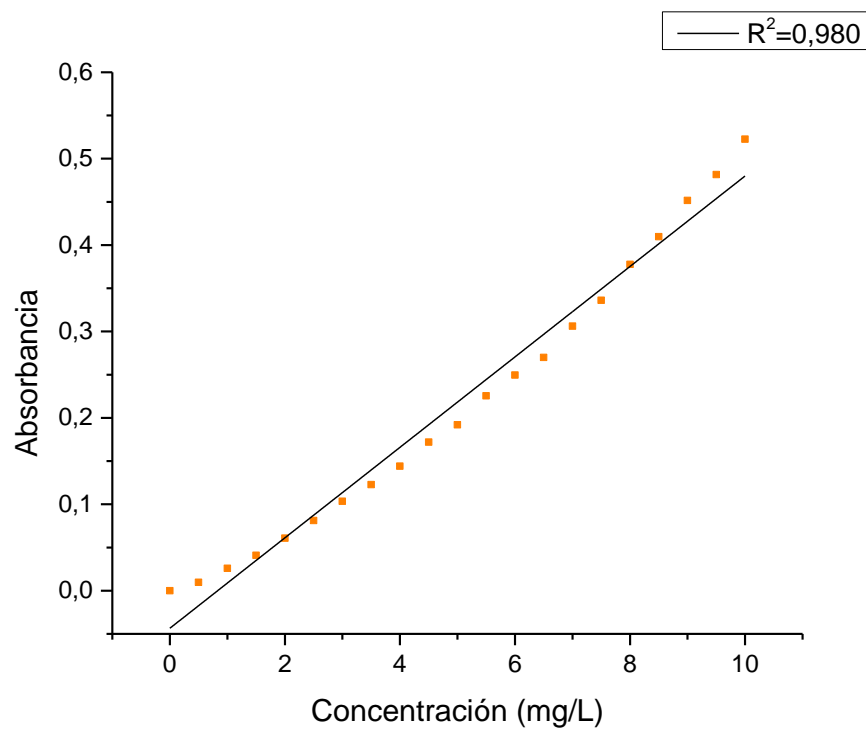


**Tabla 4.2.** Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en  $\lambda=591$  nm.

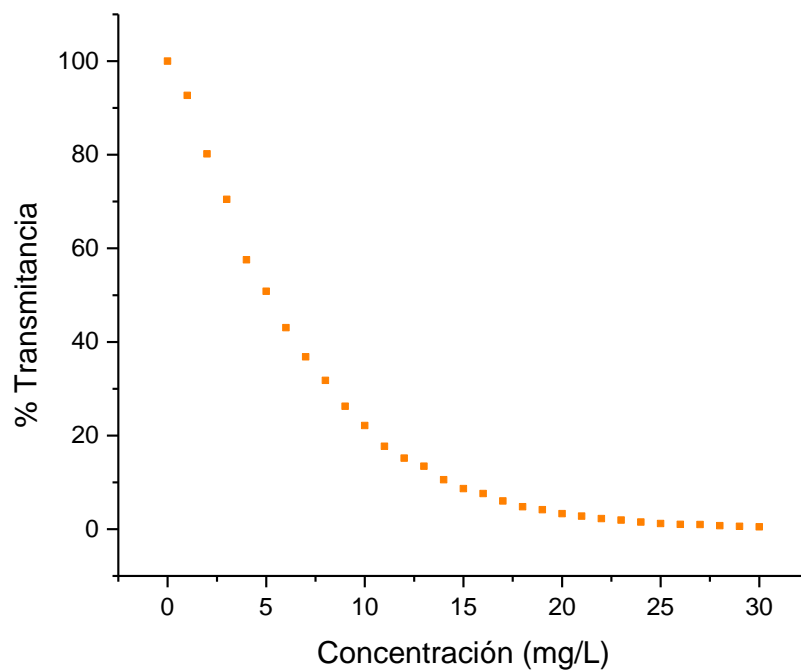
Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia	Absorbancia
1	0	100,00	0,000
2	0,5	97,81	0,010
3	1	94,21	0,026
4	1,5	91,01	0,041
5	2	86,94	0,061
6	2,5	82,96	0,081
7	3	78,81	0,103
8	3,5	75,37	0,123
9	4	71,77	0,144
10	4,5	67,32	0,172
11	5	64,27	0,192
12	5,5	59,50	0,225
13	6	56,29	0,250

14	6,5	53,71	0,270
15	7	49,41	0,306
16	7,5	46,13	0,336
17	8	41,91	0,378
18	8,5	38,94	0,410
19	9	35,34	0,452
20	9,5	32,99	0,482
21	10	30,02	0,523

**Figura 4.2.** Curva de verificación de linealidad de  $\lambda=591$  nm mediante regresión lineal empleando soluciones de azul de metileno.



**Figura 4.3.** Curva de concentración vs transmitancia obtenida mediante el espectrofotómetro comercial con  $\lambda=591$  nm.



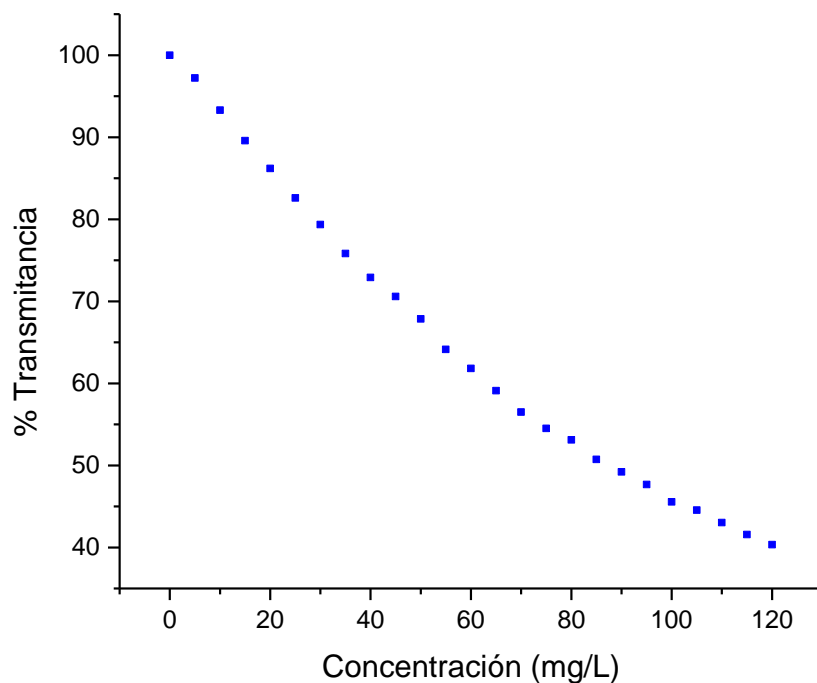
#### 4.1.2. Amarillo de titanio (luz azul $\lambda=467$ nm)

**Tabla 4.3.** Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones del amarillo de titanio, utilizando la fuente de luz azul.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia
1	0	100,00
2	5	97,21
3	10	93,29
4	15	89,58
5	20	86,19
6	25	82,60
7	30	79,35

<b>8</b>	35	75,83
<b>9</b>	40	72,91
<b>10</b>	45	70,58
<b>11</b>	50	67,86
<b>12</b>	55	64,14
<b>13</b>	60	61,82
<b>14</b>	65	59,10
<b>15</b>	70	56,51
<b>16</b>	75	54,52
<b>17</b>	80	53,12
<b>18</b>	85	50,73
<b>19</b>	90	49,20
<b>20</b>	95	47,68
<b>21</b>	100	45,55
<b>22</b>	105	44,56
<b>23</b>	110	43,03
<b>24</b>	115	41,57
<b>25</b>	120	40,33

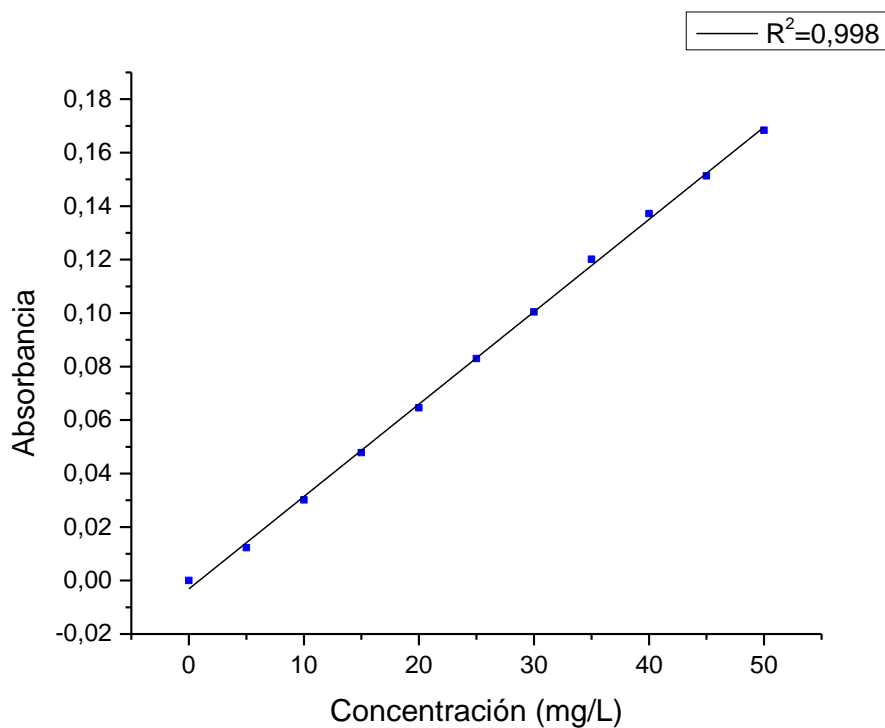
**Figura 4.4.** Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de  $\lambda=467$  nm.



**Tabla 4.4.** Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en  $\lambda=467$  nm

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia	Absorbancia
1	0	100,00	0
2	5	97,21	0,0123
3	10	93,29	0,0301
4	15	89,58	0,0478
5	20	86,19	0,0645
6	25	82,60	0,0830
7	30	79,35	0,1005
8	35	75,83	0,1202
9	40	72,91	0,1372
10	45	70,58	0,1513
11	50	67,86	0,1684

**Figura 4.5.** Curva de verificación de linealidad de  $\lambda=467$  nm mediante regresión lineal empleando soluciones de amarillo de titanio.



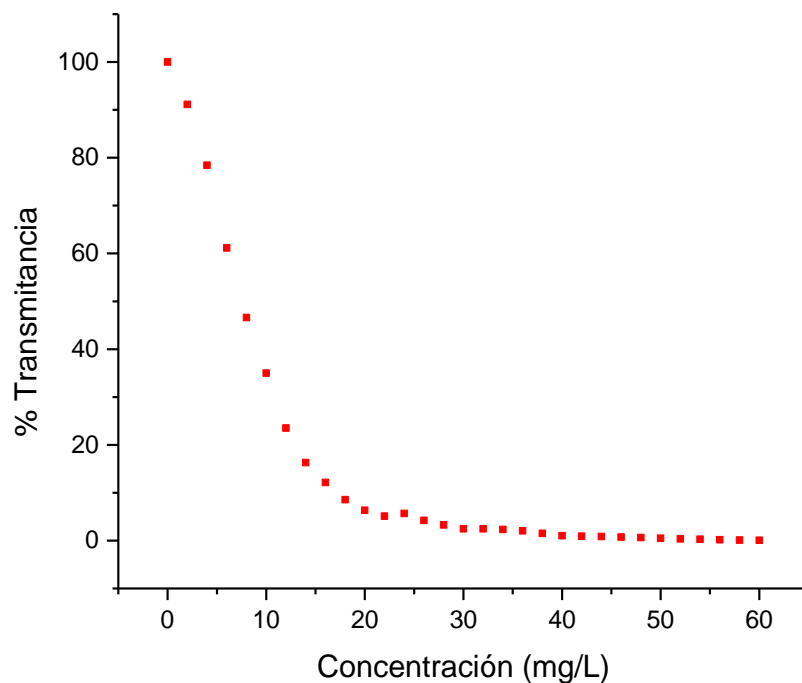
#### 4.1.3. Verde brillante (rojo $\lambda=637$ nm)

**Tabla 4.5.** Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones del verde brillante, utilizando la fuente de luz roja.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia
1	0	100,00
2	2	91,13
3	4	78,44
4	6	61,15
5	8	46,60
6	10	34,98

<b>7</b>	12	23,53
<b>8</b>	14	16,28
<b>9</b>	16	12,13
<b>10</b>	18	8,53
<b>11</b>	20	6,34
<b>12</b>	22	5,11
<b>13</b>	24	5,67
<b>14</b>	26	4,21
<b>15</b>	28	3,26
<b>16</b>	30	2,47
<b>17</b>	32	2,44
<b>18</b>	34	2,33
<b>19</b>	36	2,02
<b>20</b>	38	1,52
<b>21</b>	40	1,01
<b>22</b>	42	0,92
<b>23</b>	44	0,84
<b>24</b>	46	0,73
<b>25</b>	48	0,62
<b>26</b>	50	0,51
<b>27</b>	52	0,34
<b>28</b>	54	0,28
<b>29</b>	56	0,17
<b>30</b>	58	0,11
<b>31</b>	60	0,06

**Figura 4.6.** Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de  $\lambda=637$  nm

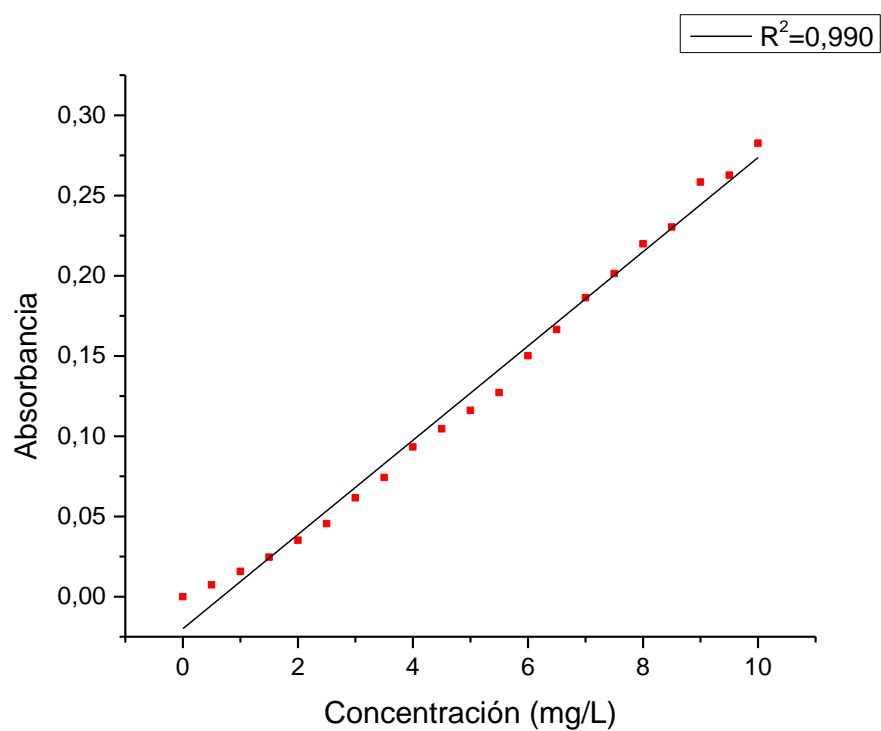


**Tabla 4.6.** Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en  $\lambda=637$  nm.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia	Absorbancia
1	0,0	100,00	0,000
2	0,5	98,33	0,007
3	1,0	96,44	0,016
4	1,5	94,50	0,025
5	2,0	92,22	0,035
6	2,5	90,06	0,045
7	3,0	86,78	0,062
8	3,5	84,28	0,074
9	4,0	80,67	0,093
10	4,5	78,61	0,105
11	5,0	76,56	0,116
12	5,5	74,61	0,127
13	6,0	70,78	0,150

14	6,5	68,17	0,166
15	7,0	65,11	0,186
16	7,5	62,89	0,201
17	8,0	60,28	0,220
18	8,5	58,83	0,230
19	9,0	55,17	0,258
20	9,5	54,61	0,263
21	10,0	52,17	0,283

**Figura 4.7.** Curva de verificación de linealidad de  $\lambda=637$  nm mediante regresión lineal empleando soluciones de verde brillante.

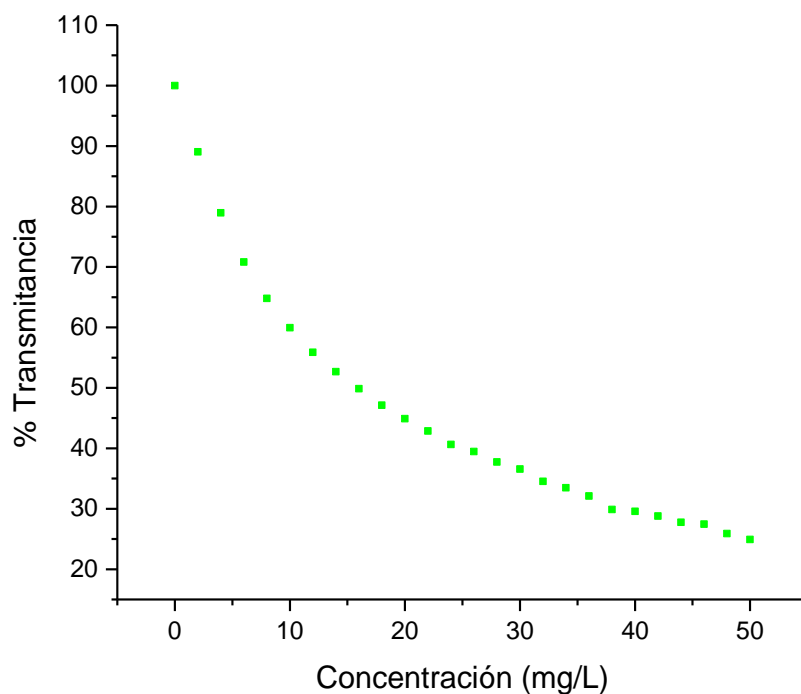


#### 4.1.4. Rodamina B (luz verde $\lambda=529$ nm)

**Tabla 4.7.** Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones de la rodamina B, utilizando la fuente de luz verde.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia
1	0	100,00
2	2	89,04
3	4	78,95
4	6	70,80
5	8	64,79
6	10	59,94
7	12	55,87
8	14	52,67
9	16	49,85
10	18	47,14
11	20	44,91
12	22	42,87
13	24	40,64
14	26	39,48
15	28	37,73
16	30	36,57
17	32	34,53
18	34	33,46
19	36	32,10
20	38	29,87
21	40	29,58
22	42	28,81
23	44	27,76
24	46	27,45
25	48	25,90
26	50	24,93

**Figura 4.8.** Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de  $\lambda=529$  nm

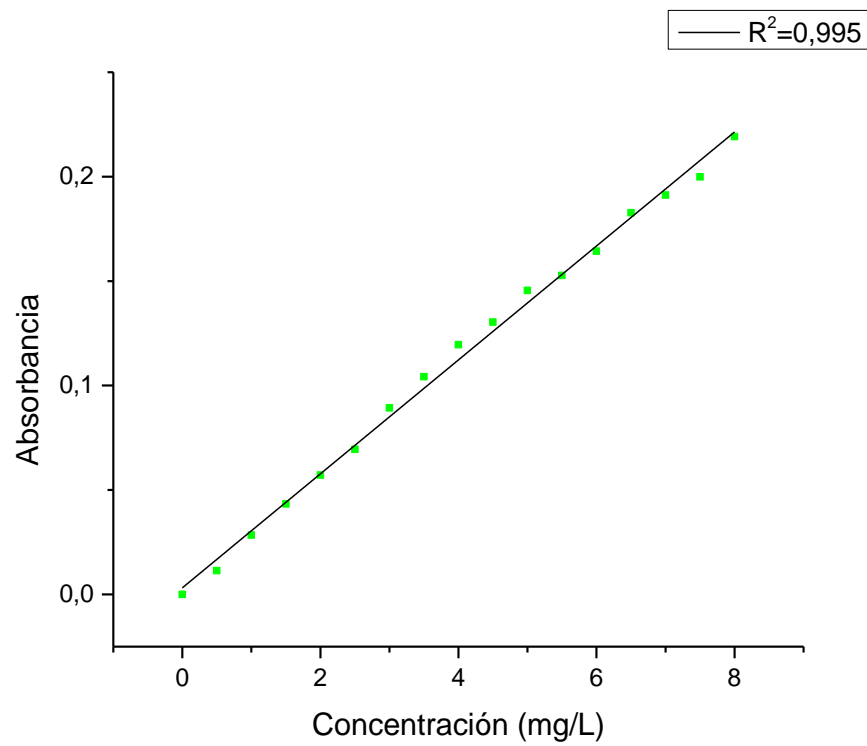


**Tabla 4.8.** Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en  $\lambda=529$  nm

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia	Absorbancia
1	0,0	100,00	0.000
2	0,5	97,41	0,011
3	1,0	93,68	0,028
4	1,5	90,51	0,043
5	2,0	87,67	0,057
6	2,5	85,22	0,069
7	3,0	81,41	0,089
8	3,5	78,67	0,104
9	4,0	75,93	0,120
10	4,5	74,07	0,130
11	5,0	71,53	0,146
12	5,5	70,35	0,153
13	6,0	68,49	0,164

14	6,5	65,66	0,183
15	7,0	64,38	0,191
16	7,5	63,11	0,200
17	8,0	60,37	0,219

**Figura 4.9.** Curva de verificación de linealidad de  $\lambda=529$  nm mediante regresión lineal empleando soluciones de rodamina B.

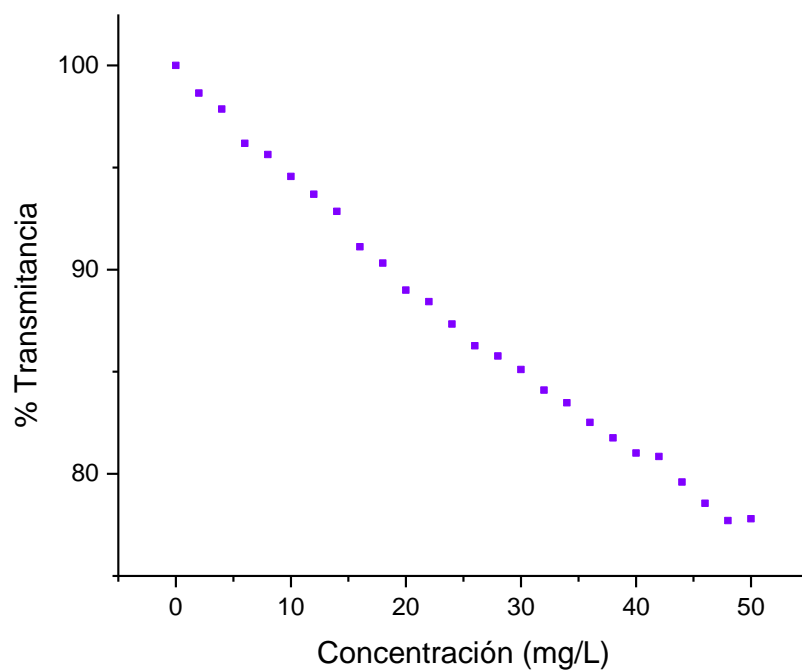


#### 4.1.5. Fluoresceína (luz violeta $\lambda=401$ nm)

**Tabla 4.9.** Determinación de los porcentajes de transmitancia para cada una de las concentraciones de la fluoresceína, utilizando la fuente de luz violeta.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia
1	0	100,00
2	2	98,64
3	4	97,86
4	6	96,19
5	8	95,63
6	10	94,56
7	12	93,69
8	14	92,85
9	16	91,12
10	18	90,32
11	20	89,00
12	22	88,43
13	24	87,34
14	26	86,27
15	28	85,77
16	30	85,11
17	32	84,10
18	34	83,48
19	36	82,52
20	38	81,76
21	40	81,02
22	42	80,85
23	44	79,60
24	46	78,55
25	48	77,71
26	50	77,80

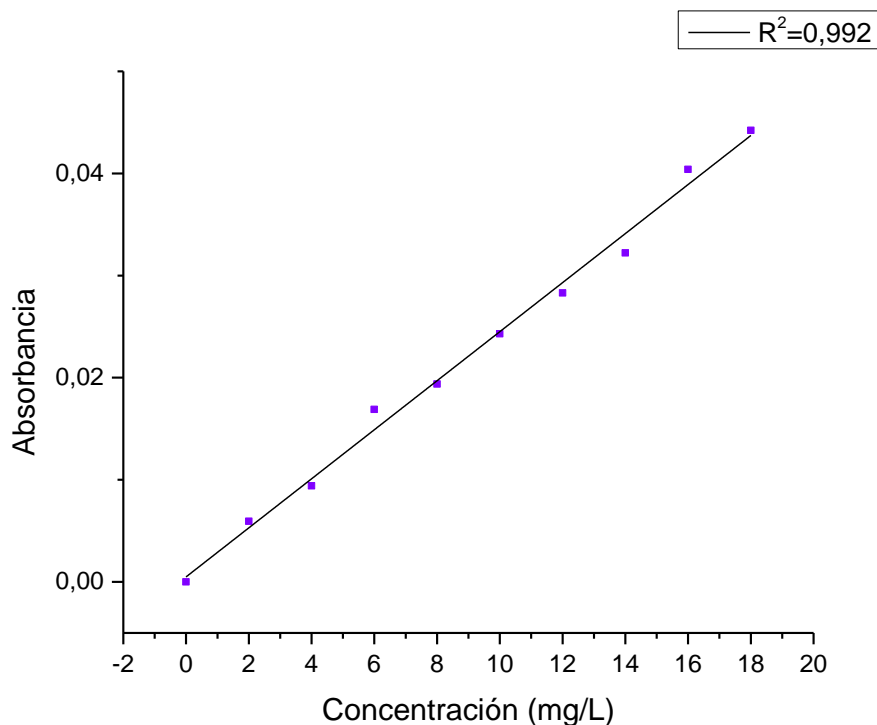
**Figura 4.10.** Curva de concentración vs transmitancia dentro del intervalo de respuesta de  $\lambda=401$  nm



**Tabla 4.10.** Valores de absorbancia medidos para la determinación de linealidad en  $\lambda=401$  nm.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia	Absorbancia
1	0	100,00	0,000
2	2	98,64	0,006
3	4	97,86	0,009
4	6	96,19	0,017
5	8	95,63	0,019
6	10	94,56	0,024
7	12	93,69	0,028
8	14	92,85	0,032
9	16	91,12	0,040
10	18	90,32	0,044

**Figura 4.11.** Curva de verificación de linealidad de  $\lambda=401$  nm mediante regresión lineal empleando soluciones de fluoresceína.



Los resultados obtenidos en las verificaciones de linealidad para cada una de las longitudes de onda se resumen en la **Tabla 4.11.** , donde se observan los valores de  $R^2$  para cada una de las longitudes de onda del equipo.

**Tabla 4.11.** Resultados de la verificación de la linealidad del equipo.

Color de la fuente	Longitud de onda	Intervalo de concentración (mg/L)	$R^2$
<b>Amarillo</b>	591	0-10	0.980
<b>Azul</b>	467	0-50	0.998
<b>Rojo</b>	637	0-10	0.990
<b>Verde</b>	529	0-8	0.995
<b>Violeta</b>	401	0-18	0.992

En general, la verificación de la linealidad del equipo dentro de los intervalos de concentración mostró un valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) muy cercano a uno, lo que indica una linealidad bastante aceptable. La longitud de onda que presento un mayor grado de linealidad fue la de 467 nm con un  $R^2$  de 0.998, siendo la de menor grado la correspondiente a 591 nm con un  $R^2$  de 0.980.

## 4.2. DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y LINEALIDAD DEL EQUIPO

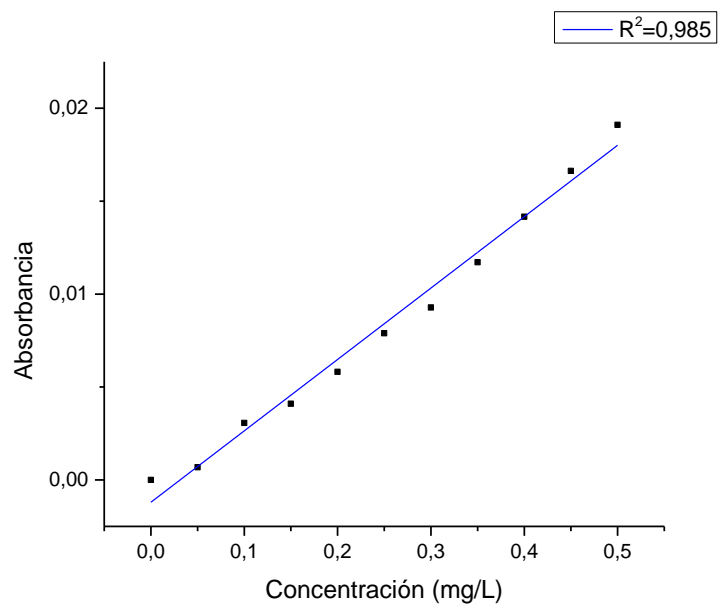
Para la determinación de la sensibilidad y linealidad del colorímetro se eligió la longitud de onda  $\lambda=591$  nm, correspondiente a la luz amarilla y se emplearon tres diferentes escalas de concentración para el azul de metileno. Este procedimiento se repitió utilizando el espectrofotómetro comercial a fin de tener una referencia para contrastar los valores obtenidos. Los resultados de lo anterior se presentan a continuación:

### 4.2.1. Escala de concentración de 0.05 mg/L

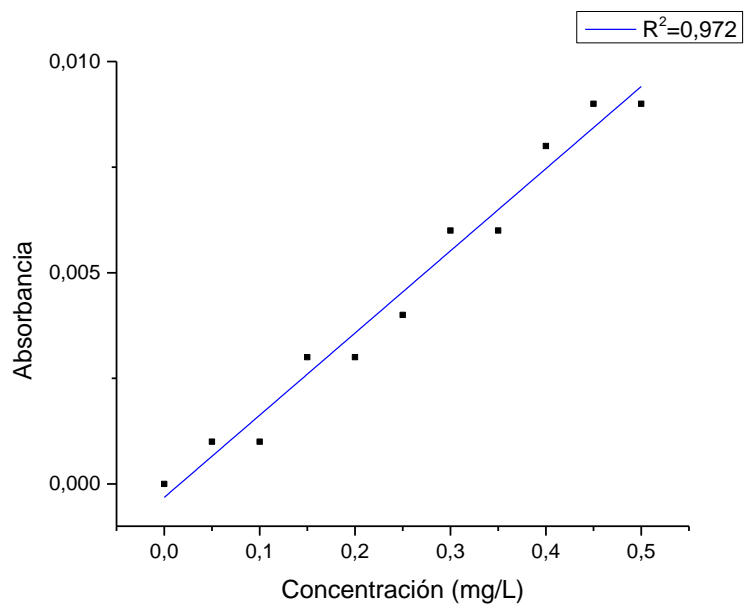
**Tabla 4.12.** Valores de porcentaje de transmitancia y absorbancia obtenidos tras la exploración inicial de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de concentración de 0.05 mg/L.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia Colorímetro	Absorbancia Colorímetro	Absorbancia Espectrofotómetro
1	0,00	100,00	0,000	0.000
2	0,05	99,84	0,001	0,001
3	0,10	99,30	0,003	0,001
4	0,15	99,06	0,004	0,003
5	0,20	98,67	0,006	0,003
6	0,25	98,20	0,008	0,004
7	0,30	97,89	0,009	0,006
8	0,35	97,34	0,012	0,006
9	0,40	96,79	0,014	0,008
10	0,45	96,24	0,017	0,009
11	0,50	95,70	0,019	0,009

**Figura 4.12.** Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.



**Figura 4.13.** Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.

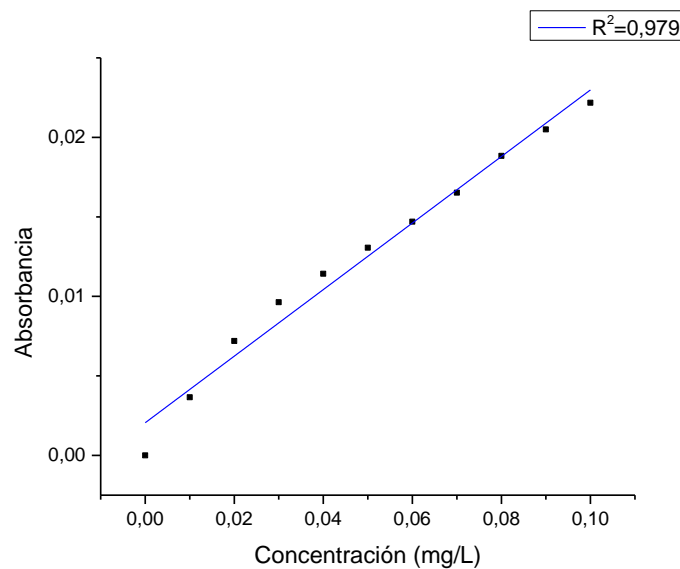


#### 4.2.2. Escala de concentración de 0.01 mg/L

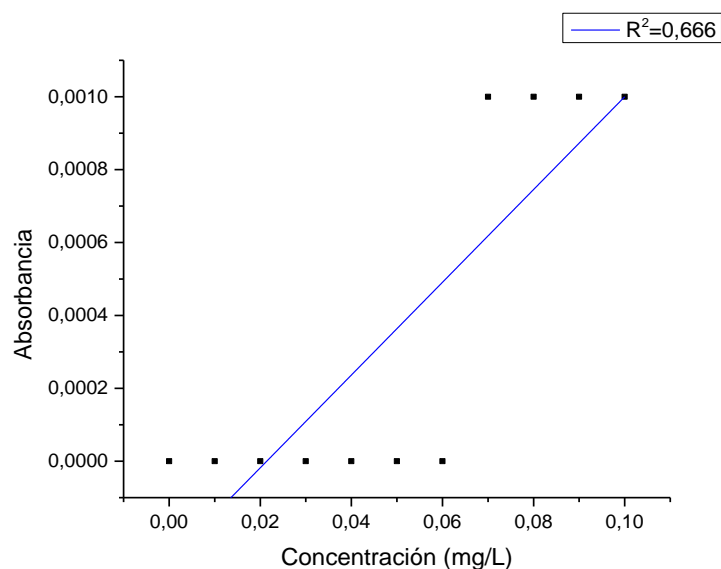
**Tabla 4.13.** Valores de porcentaje de transmitancia y absorbancia obtenidos en la segunda exploración de la sensibilidad del equipo empleando intervalos de concentración de 0.01 mg/L.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia Colorímetro	Absorbancia Colorímetro	Absorbancia Espectrofotómetro
1	0,00	100,00	0,000	0
2	0,01	99,16	0,004	0
3	0,02	98,36	0,007	0
4	0,03	97,81	0,010	0
5	0,04	97,40	0,011	0
6	0,05	97,04	0,013	0
7	0,06	96,67	0,015	0
8	0,07	96,27	0,017	0,001
9	0,08	95,75	0,019	0,001
10	0,09	95,39	0,021	0,001
11	0,10	95,02	0,022	0,001

**Figura 4.14.** Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.



**Figura 4.15.** Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.



#### 4.2.3. Escala de concentración de 0.005 mg/L

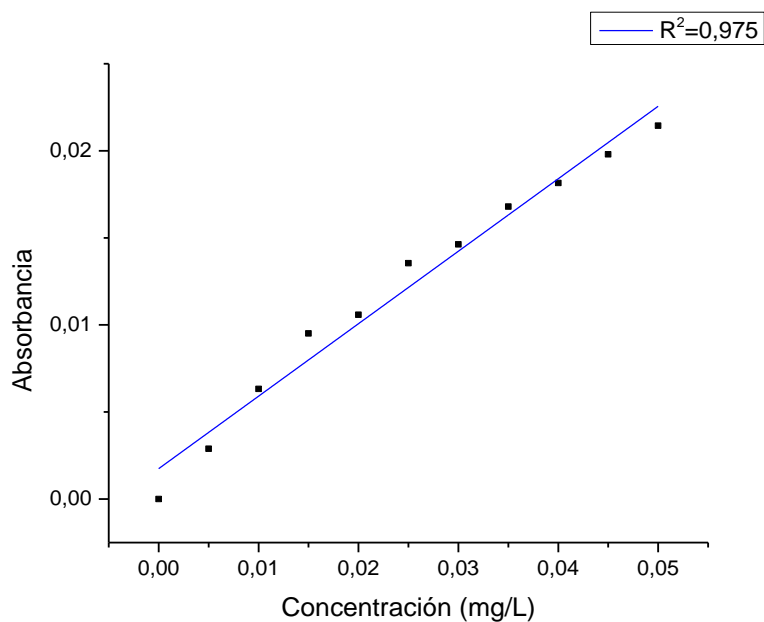
Para esta escala solo se obtuvieron datos a partir del colorímetro debido a que el espectrofotómetro no registró variaciones en la absorbancia.

**Tabla 4.14.** Valores de porcentaje de transmitancia y absorbancia obtenidos tras la tercera y última exploración de la sensibilidad del equipo, empleando intervalos de concentración de 0.005 mg/L.

Puntos	Concentración (mg/L)	%Transmitancia Colorímetro	Absorbancia Colorímetro
1	0,000	100,00	0,000
2	0,005	99,34	0,003
3	0,010	98,55	0,006
4	0,015	97,83	0,010
5	0,020	97,59	0,011
6	0,025	96,93	0,014
7	0,030	96,69	0,015
8	0,035	96,21	0,017

9	0,040	95,91	0,018
10	0,045	95,54	0,020
11	0,050	95,18	0,021

**Figura 4.16.** Curva de calibración para intervalos de concentración de 0.005 mg/L.



**Tabla 4.15.** Parámetros analíticos de la curva de calibración obtenida para la determinación de la sensibilidad.

Calibración para intervalos de concentración de 0.001 mg/L.	
Parámetros	
Sensibilidad (mg/L)	0.005
R <sup>2</sup>	0.975
Pendiente (ua/mg·L <sup>-1</sup> )	0.426
Intercepto en Y (ua)	0.001
LOD (mg·L <sup>-1</sup> )	0.007
Número de puntos	11

**Tabla 4.16.** Comparación entre los resultados de la sensibilidad y linealidad de los equipos.

Escala de concertación (mg/L)	R <sup>2</sup>		Respuesta lineal	
	Colorímetro	Espectrofotómetro	Colorímetro	Espectrofotómetro
<b>0.05</b>	0.985	0.972	si	si
<b>0.01</b>	0.979	0.666	si	no
<b>0.005</b>	0.975	-	si	no

A partir de las tres exploraciones realizadas con el fin de determinar la sensibilidad del equipo se llegó al punto de establecer que esta es limitada por la resolución del software Zelescope, debido a que este programa tiene una resolución máxima de 1.35 Hz como se señaló en el apartado **3.1.5.** de sistema de registro. Mediante la curva de calibración ilustrada en la **Figura 4.16.** se determinó que el equivalente de la resolución máxima del software (1.35Hz) es aproximadamente 0.005 mg/L expresado en términos de la concentración; es decir si se produce una variación de 0.005 mg/L o menor a esta en la celda del colorímetro, será registrada como una variación de 1.35 Hz en la frecuencia de la señal proveniente del equipo medida mediante Zelescope.

Expresando esta resolución en términos de % de transmitancia y absorbancia equivale a 0.24% y 0.001 respectivamente. Esta conversión se realizó con ayuda de la ecuación de la recta de la curva de calibración obtenida en la **Figura 4.13.**

De acuerdo a los valores consignados en la **Tabla 4.16.** se puede afirmar que el colorímetro diseñado presenta una mayor sensibilidad comparada con la del espectrofotómetro Shimadzu, ya que este último no mostró respuesta a escalas de concentración menores a 0.01. mg/L. Por otro lado el colorímetro, logró responder a variaciones del orden de 0.005 mg/L con una respuesta lineal sustentada en un R<sup>2</sup> de 0.975.

Los resultados anteriores evidencian claramente la capacidad del colorímetro en cuanto a linealidad y sensibilidad, estando esta última limitada por el sistema de registro y no por el diseño del equipo.

## 5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para el diseño y construcción del colorímetro, demostró su utilidad como un equipo instrumental destinado inicialmente para la determinación de concentraciones de sustancias coloreadas en soluciones acuosas, empleando el método de curvas de calibración.

Fue posible obtener un equipo de calidad con características destacables como alta sensibilidad, linealidad, portabilidad y robustez sin recurrir a un diseño complejo y con alto costo. Además de su facilidad para conectarse con cualquier computador a través de su puerto USB, consolidándose como un equipo portable, posibilitando su aplicación bajo condiciones de movimiento debido a que su sistema óptico se unificó en una sola pieza, lo que a su vez potencio su robustez.

La simplificación y miniaturización del instrumento como medidor de concentraciones, se presenta como una ventaja debido a sus características de fácil uso, y cómoda manipulación. A su vez este equipo ofrece, versatilidad en la configuración de su diseño, puesto que está fabricado a base de componentes sencillos, lo que posibilita la modificación de este para potenciar su aplicación.

Con este proyecto se logró mostrar que es posible realizar un instrumento sencillo de buena calidad y con características equiparables a los equipos comerciales, haciendo uso de la electrónica y la instrumentación química.

## 6. RECOMENDACIONES

Ampliar el número de fuentes monocromáticas puntuales para lograr maximizar su aplicación a una mayor cantidad de compuestos, esto se podría conseguir implementando más LEDs con diferentes longitudes de onda de emisión en la fuente de radiación.

Realizar una modificación del circuito para poder eliminar el uso de batería como fuente de alimentación eléctrica, y lograr sustituirla por el voltaje de 5.0 V suministrado por los puertos USB de los computadores. Lo anterior podría lograrse ya que, el componente electrónico C. I. 555 requiere un voltaje de suministro entre 4.5 y 18 V, y los demás elementos del circuito funcionan con voltajes menores a 5 Voltios. El suministro del voltaje al equipo podría conducirse mediante un cable blindado estéreo, empleando uno de los canales para este fin y el otro para la señal contenedora de la información generada por el equipo.

Por otro lado podría cambiarse la celda por una con geometría cubica para determinar si esta mejora los resultados en las mediciones, para lo cual también sería necesario modificar la geometría del portamuestra.

Reemplazar el programa que procesa la señal por uno desarrollado bajo herramientas de MATLAB, desarrollando una rutina de programación donde el computador solo pida introducir el blanco y las diferentes soluciones con sus respectivos valores de concentración para la curva de calibración, y así una vez finalizado el proceso de medición este arroje directamente los resultados graficados y el cálculo de las concentraciones. Lográndose de esta forma simplificar en gran medida los tiempos de análisis.

## BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, R.; POBLETE, V. Síntesis, caracterización estructural y espectroscópica de materiales luminiscentes. En: Ciencia al Día internacional Vol.,4 (Nov de 2001); p. 1-23.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. Fundamentos de circuitos eléctricos. 3 edición. Mexico, D.F.: MCGRAW-HILL, 2006. p. 105-108.

ARENY, R. P. Sensores y acondicionadores de señal: Marcombo, 2003. p. 4-15.

AYA-RAMÍREZ, O.; MEJÍA, E.; CABANZO, R.; FONSECA, J.; PADILLA, D. Espectroscopía de emisión ICP en materiales de interés tecnológico: carbón. En: Revista Colombiana de Física. Vol.,34 (2002); p. 201.

CALDERONE, G.; GUILLOU, C.; RENIERO, F.; NAULET, N. Helping to authenticate sparkling drinks with  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  of  $\text{CO}_2$  by gas chromatography-isotope ratio mass spectrometry. En: Food research international. Vol.,40 (2007); p. 324-331.

CANGELOSO, S. LED Lighting: A Primer to Lighting the Future: O'Reilly Media, Incorporated, 2012. p. 9, 43.

COMPONENTS, R. Light dependent resistors. Nothants: Electrocomponents Company, 1997.

DASGUPTA, P. K.; BELLAMY, H. S.; LIU, H.; LOPEZ, J. L.; LOREE, E. L.; MORRIS, K.; PETERSEN, K.; MIR, K. A. Light emitting diode based flow-through optical absorption detectors. En: Talanta. Vol.,40 (1993); p. 53-74.

DE LIMA, K. M. G. A portable photometer based on LED for the determination of aromatic hydrocarbons in water. En: Microchemical Journal. Vol.,103 (2012); p. 62-67.

DONATE, A. H. Electrónica Aplicada: Marcombo, S.A., 2011. p. 18-31, 57-67, 294-300

FICHET, P.; MAUCHIEN, P.; WAGNER, J.-F.; MOULIN, C. Quantitative elemental determination in water and oil by laser induced breakdown spectroscopy. En: *Analytica chimica acta*. Vol.,429 (2001); p. 269-278.

FONSECA, A.; RAIMUNDO JR, I. M. A multichannel photometer based on an array of light emitting diodes for use in multivariate calibration. En: *Analytica Chimica Acta*. Vol.,522 (2004); p. 223-229.

FONSECA, A.; RAIMUNDO JR, I. M. A simple method for water discrimination based on an light emitting diode (LED) photometer. En: *Analytica chimica acta*. Vol.,596 (2007); p. 66-72.

GAGO, A.; CALDERÓN, A. G.; FRAILE, J. Iluminación con tecnología LED: Ediciones Paraninfo. S.A., 2012. p. 13-33.

GAIÃO, E. d. N.; DOS SANTOS, S. R. B.; DOS SANTOS, V. B.; DO NASCIMENTO, E. C. L.; LIMA, R. S.; DE ARAÚJO, M. C. U. An inexpensive, portable and microcontrolled near infrared LED-photometer for screening analysis of gasoline. En: *Talanta*. Vol.,75 (2008); p. 792-796.

GERMÁN SANTAMARÍA, A. C.; HERRANZ, G. S.; OLIVA, A. C. *Electrotecnia*: Editorial Editex, 2009. p. 57.

GRANÉS, J.; CÁRDENAS, J. L. *Isaac Newton: obra y contexto: una introducción*: Univ. Nacional de Colombia, 2005.

HAUSER, P. C.; RUPASINGHE, T. W. Simultaneous determination of metal ion concentrations in binary mixtures with a multi-LED photometer. En: *Fresenius' journal of analytical chemistry*. Vol.,357 (1997); p. 1056-1060.

HERNANDEZ, W. Linear robust photometer circuit. En: *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol.,141 (2008); p. 447-453.

HOLKOVA, L. *Química analítica cualitativa: teoría y práctica*: Trillas, 1988.

HYVARINEN, T. S.; NIEMELA, P. Rugged multiwavelength NIR and IR analyzers for industrial process measurements. En: *The Hague'90*. Vol.,1 (12-16 April of 1990); p. 99-104.

INGLE, J. D.; CROUCH, S. R. Spectrochemical analysis. En: Englewood Cliffs, NJ. Vol., (1988); p. 78-81.

JAMBUNATHAN, S.; DASGUPTA, P. K.; WOLCOTT, D. K.; MARSHALL, G. D.; OLSON, D. C. Optical fiber coupled light emitting diode based absorbance detector with a reflective flow cell. En: Talanta. Vol.,50 (1999); p. 481-490.

KOEL, M.; KALJURAND, M. Application of the principles of green chemistry in analytical chemistry. En: Pure and applied chemistry. Vol.,78 (2006); p. 1993-2002.

LINDON, J. C. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry: Online: Elsevier Science, 2010.

MCCLURE, W.; MOODY, D.; STANFIELD, D.; KINOSHITA, O. Hand-held NIR spectrometry. Part II: An economical no-moving parts spectrometer for measuring chlorophyll and moisture. En: Applied spectroscopy. Vol.,56 (2002); p. 720-724.

MONTERO, A. C. Electrónica: Editorial Editex, 2009. p. 57.

MORENO, N. E. F.; MARTÍNEZ, J. E. F. Física Moderna Edición Revisada: Pearson Educación, p. 30,35.

PIGNALOSA, G.; SIXTO, A.; KNOCHEN, M. Automatic determination of insolubles in lubricating oils by flow injection analysis employing an LED-photometer detector. En: Talanta. Vol.,73 (2007); p. 959-961.

PRODUCTS, P. S. L. NE/SA/SE555/SE555C. Eindhoven: Philips Semiconductors, 1994.

RESTREPO, E.; DEVIA, A.; DEL PLASMA, L. d. F.; COLOMBIA, M. Caracterización de Materiales Utilizando la Espectroscopía Óptica de Emisión. En: Revista colombiana de física. Vol.,34 (2002); p. 478.

SALAZAR, A. J. Fundamentos de circuitos. Bogotá D.C., Colombia: Ediciones Uniandes, 2009. p. 4.

SEMICONDUCTOR, N. LMC555. California: National Semiconductor Corporation, 2010.

SERRANO, S. d. L. Á. Nuevas técnicas en Astronomía Infrarroja: Estudio de imágenes profundas en la banda K'. 2002, 17. Trabajo de investigación (Físico), Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias físicas.

SILVA, M. B. d.; CRISPINO, C. C.; REIS, B. F. Automatic photometric titration procedure based on multicommutation and flow-batch approaches employing a photometer based on twin LEDs. En: Journal of the Brazilian Chemical Society. Vol.,21 (2010); p. 1854-1860.

SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R.; HOLLER, F. J.; ANZURES, M. B. Principios de análisis instrumental. 6 edición. México, D.F.: Cengage Learning Latin America, 2008. p. 131-211.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J. Fundamentos de química analítica: Reverté, 1997. p. 717-881.

TSUSHO, K. D. GL55 Series Photoresistor China2002.

VARGAS, M. E. S.; EUGENIA, M. Preconcentración selectiva de fenoles contaminantes prioritarios y determinación por espectrofotometría ultravioleta-visible, cromatografía líquida de alta eficacia y cromatografía de gases-espectrometría de masas: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2003.

VOGEL, A. I.; CATALANO, M.; CATALANO, E. Química analítica cuantitativa: Kapelusz Buenos Aires, 1960.

WORKS, A. The LED Light {En línea}, 2014. {12 de Enero de 2015}. Disponible en: [http://users.ipfw.edu/broberg/documents/LED\\_Data.pdf](http://users.ipfw.edu/broberg/documents/LED_Data.pdf).

ZÁRATE, N.; PÉREZ-OLMOS, R.; REIS, B. F. d. Turbidimetric determination of sulfate in rainwater employing a LED based photometer and multicommutated flow analysis system with in-line preconcentration. En: Journal of the Brazilian Chemical Society. Vol.,22 (2011); p. 1009-1014.

ZHANG, M.; ZHANG, Z.; YUAN, D.; FENG, S.; LIU, B. An automatic gas-phase molecular absorption spectrometric system using a UV-LED photodiode based detector for determination of nitrite and total nitrate. En: *Talanta*. Vol.,84 (2011); p. 443-450.

## ANEXOS

### Anexo A. Diseño del prototipo del instrumento

Registro fotográfico de las etapas de construcción del colorímetro.

**Figura A.3.1.** Corte inicial de la lámina de aluminio empleada para fabricar la caja negra o cuerpo del equipo.



**Figura A.3.2.** Perforación de orificios, doblez de caras, pestañas y aplicación de pintura negra en la parte interna de la lámina.



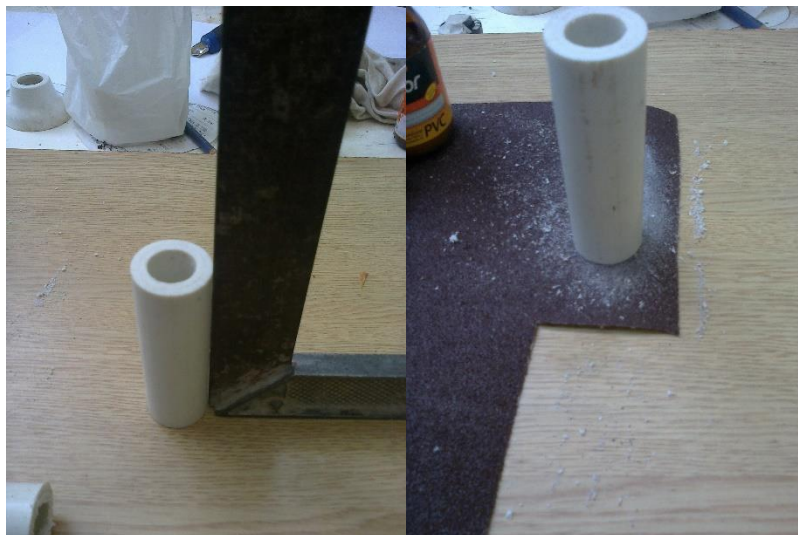
**Figura A.3.3.** Caja terminada lista para el ensamble de circuito electrónico y el sistema óptico.



**Figura A.3.4.** Material de partida para la fabricación del portamuestras, constituido por dos tubos de PVC de 1/2 y 3/4". introducido uno dentro del otro.



**Figura A.3.5.** Corte y ajuste del porta muestra a la longitud de la caja.



**Figura A.3.6.** Perforación de orificios y montaje de LEDs y LDRs dentro de los mismos.



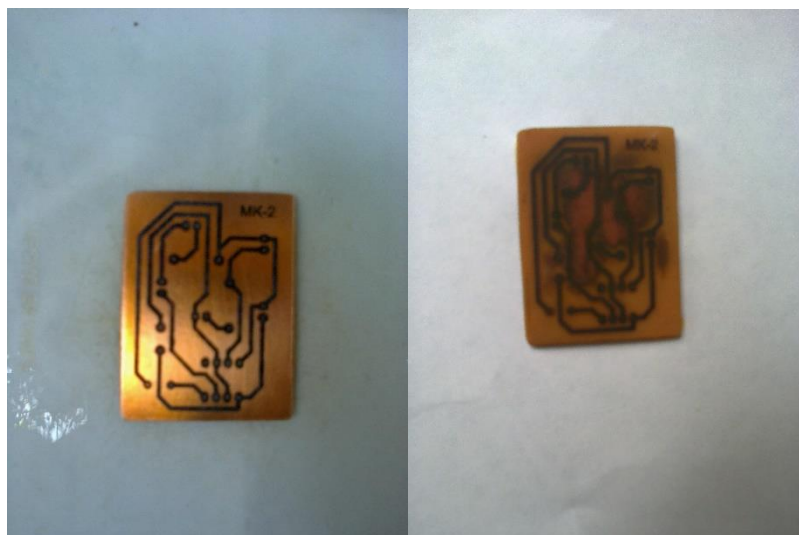
**Figura A.3.7.** Configuración de terminales y soldadura de estos según el diagrama electrónico de la **Figura 3.16.**



**Figura A.3.8.** Fabricación de la interfaz que acopla el circuito con la tarjeta de sonido de la PC, Construido a partir de dos tampones PVC, una fracción de tubo, el microcrofono, parlante y cable blindado.



**Figura A.3.9.** Fabricación del circuito impreso.



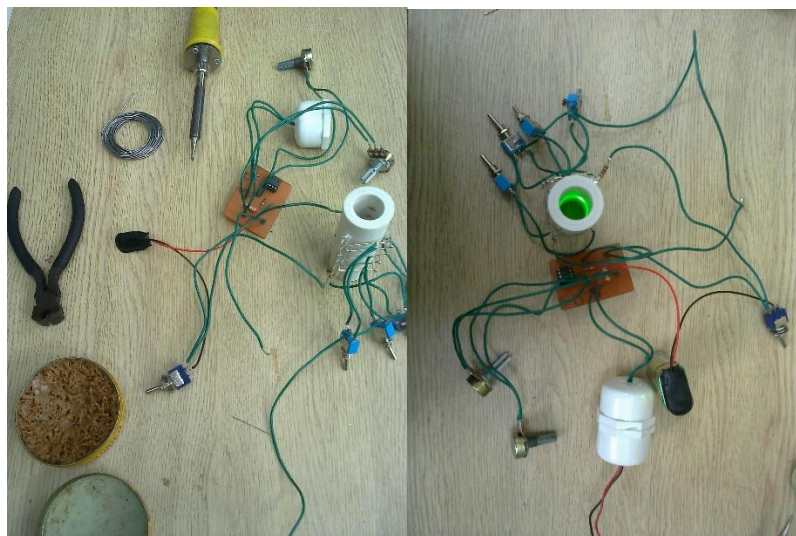
Para el proceso de fabricación del circuito impreso, se diseñó el esquema mediante el software PCB Wizard, del cual se obtuvo el negativo del esquema mostrado en la baquelita de la figura anterior. El esquema se transfirió a la baquelita mediante la técnica del planchado; que consiste en imprimir el circuito en un papel de superficie liza, como por ejemplo papel satinado, utilizando una impresora láser, posteriormente colocar la impresión sobre la cara de cobre de la baquelita previamente limpiada y pulida y sobre estas la plancha dejándola calentar durante 5 minutos para que la tinta de la impresión se transfiera a la superficie de cobre, luego retirar el papel cuidadosamente de la baquelita obteniéndose así una impresión de calidad. Posteriormente se sumerge la baquelita en una solución de cloruro férrico el cual reacciona con el cobre que no está protegido por la tinta de la impresión, quedando al final solo las pistas de cobre listas para la perforación de los agujeros donde se soldaran los respectivos componentes que conformaran el circuito electrónico.

**Figura A.3.10.** Vista del circuito impreso luego del tratamiento con cloruro férrico.

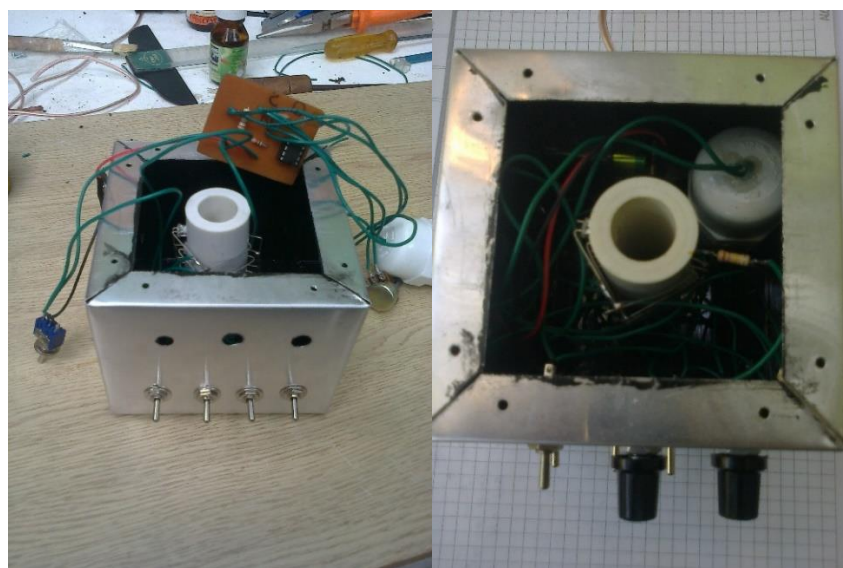




**Figura A.3.13.** Unificación de todas las partes del circuito electrónico del colorímetro



**Figura A.3.14.** Montaje y ajuste del circuito electrónico y sistema óptico dentro de la caja oscura.



## Anexo B. Puesta en marcha del equipo

Figura A.3.15. Prueba preliminar para la luz amarilla

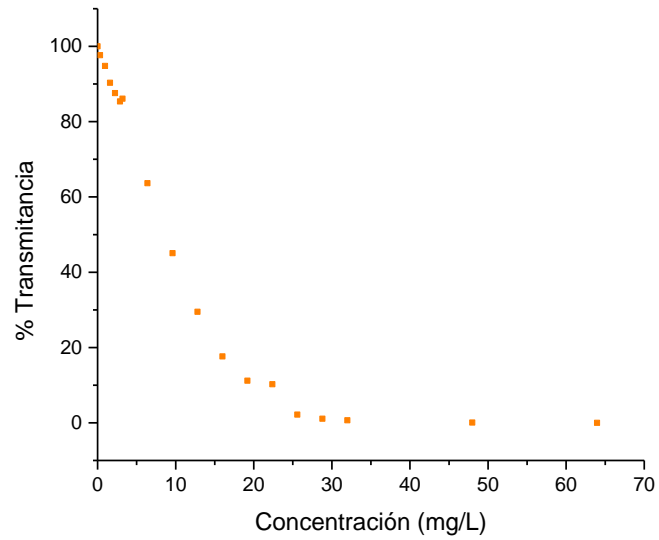
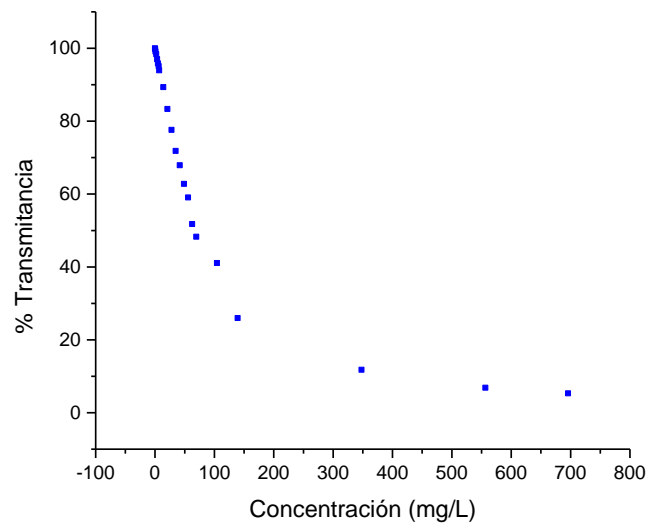
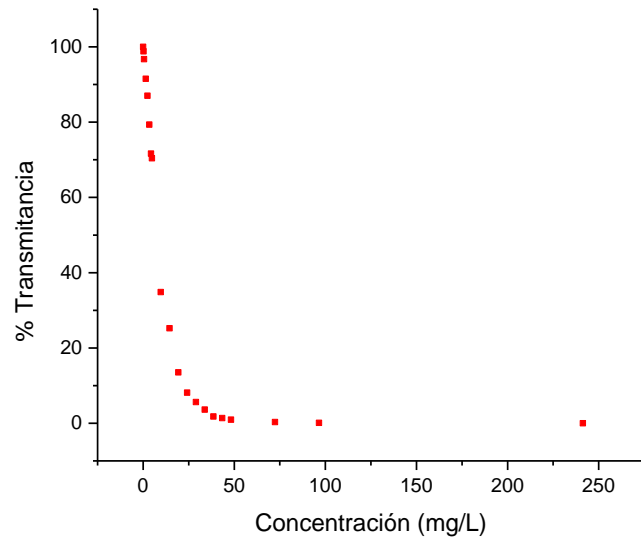


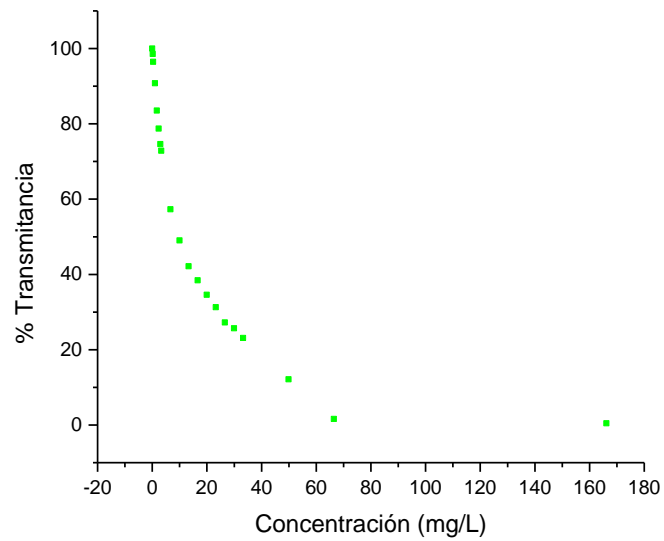
Figura A.3.16. Prueba preliminar para la luz azul.



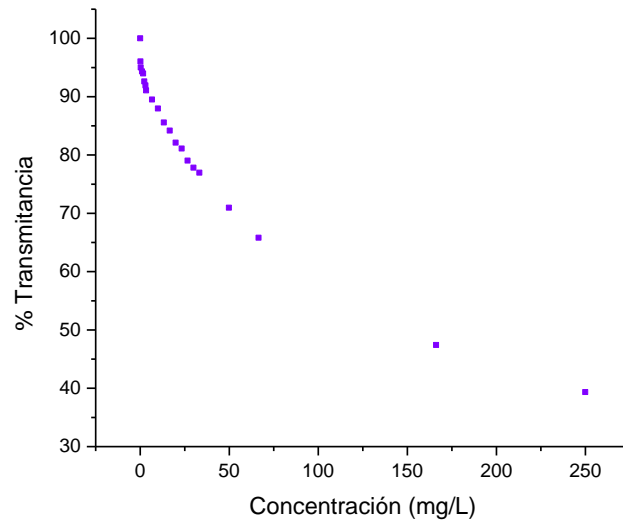
**Figura A.1.17.** Prueba preliminar para la luz roja.



**Figura A.3.18.** Prueba preliminar para la luz verde.



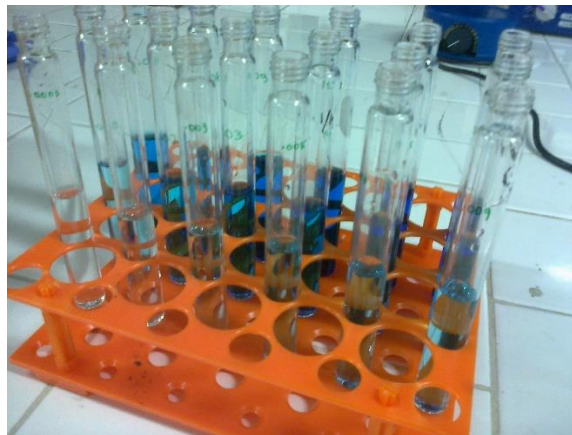
**Figura A.3.19.** Prueba preliminar de la luz violeta.



A partir de las gráficas anteriores se decidieron los intervalos de concentración de las soluciones de referencia para verificar la respuesta y linealidad de cada una de las cinco longitudes de onda del equipo.

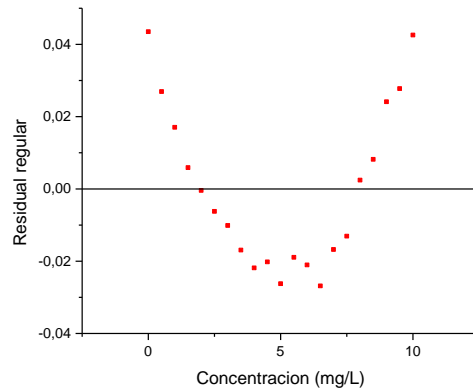
### **Anexo C. Preparación de soluciones de referencia**

**Figura A.3.20.** Diluciones preparadas a partir de la solución concentrada de azul de metileno, se procedió de forma similar para los demás compuestos.

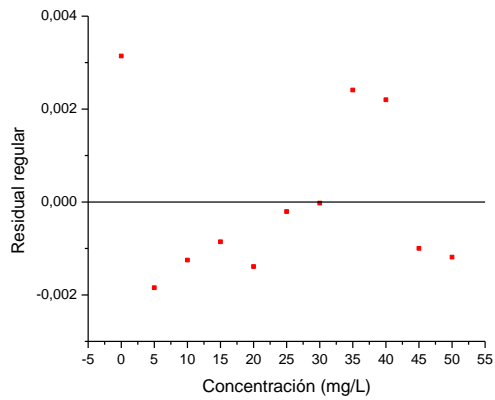


## Anexo D. Calibración

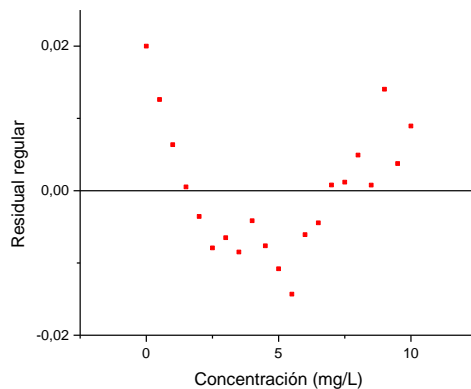
**Figura A.4.21.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de  $\lambda=591$  nm, empleando soluciones de azul de metileno.



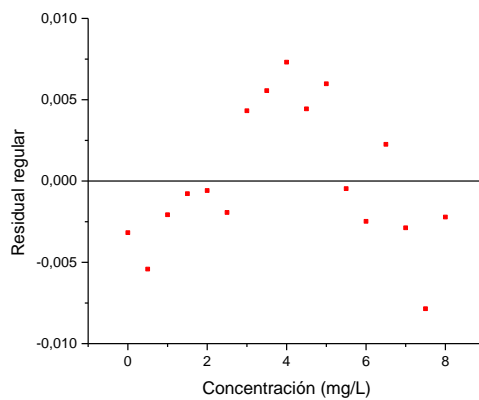
**Figura A.4.22.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de  $\lambda=467$  nm empleando soluciones de amarillo de titanio.



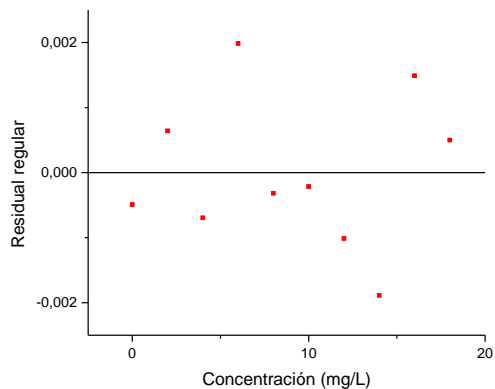
**Figura A.4.23.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de  $\lambda=637$  nm empleando soluciones de verde brillante.



**Figura A.4.24.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de  $\lambda=529$  nm empleando soluciones de rodamina B.

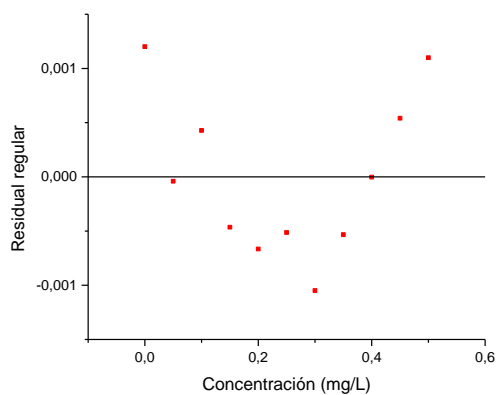


**Figura A.4.25.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de verificación de linealidad de  $\lambda=401$  nm empleando soluciones de fluoresceína.

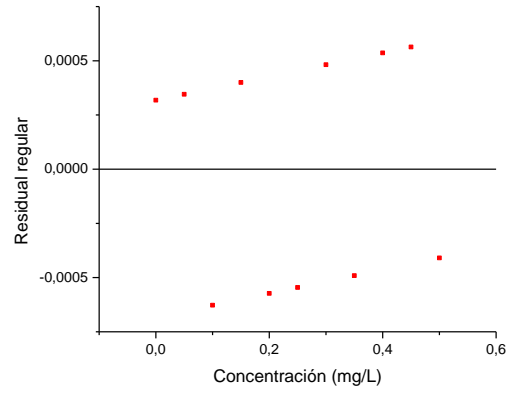


## Anexo E. Determinación de la sensibilidad y linealidad

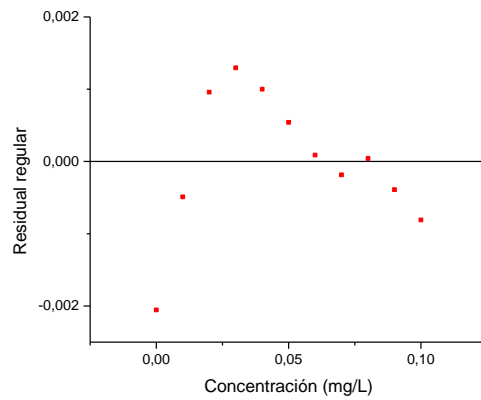
**Figura A.4.26.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.



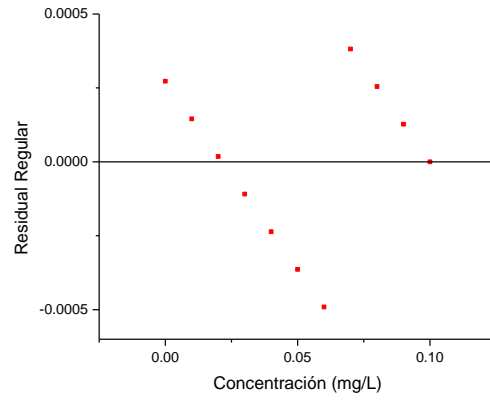
**Figura A.4.27.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.05 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.



**Figura A.4.28.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.



**Figura A.4.29.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.01 mg/L, obtenida mediante el espectrofotómetro.



**Figura A.4.30.** Gráfica de residuales de SLR de la curva de calibración para intervalos de concentración de 0.005 mg/L, obtenida mediante el colorímetro.

