

# Implementación de un Sistema de Detección y Medición de la Turbiedad del Agua usando Fibra Óptica

Ana Alvarado L. <sup>(1)</sup> Betty Florencia M. <sup>(2)</sup> Germán Vargas L. <sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación. <sup>(1)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
[anacralv@espol.edu.ec](mailto:anacralv@espol.edu.ec) <sup>(1)</sup> [bflorenc@fiec.espol.edu.ec](mailto:bflorenc@fiec.espol.edu.ec) <sup>(2)</sup>  
Profesor FIEC-ESPOL, [gvargas@fiec.espol.edu.ec](mailto:gvargas@fiec.espol.edu.ec) <sup>(3)</sup>

## Resumen

*En este trabajo se presenta la implementación de un Sistema de Detección y Medición de la Turbiedad del Agua usando Fibra Óptica; para su desarrollo fue necesario estudiar la Ley de Beer-Lambert, el proceso de absorción de la radiación electromagnética, dispersión de partículas suspendidas en el agua, así como también las diferentes técnicas de dispersión existentes, además de las longitudes de onda de los colores que fueron utilizados como fuentes de luz y todos los parámetros asociados con la fibra óptica. El proyecto se realizó mediante el uso de componentes ópticos y electrónicos; se diseñó un sistema que consta de un circuito emisor constituido por LEDs de color rojo y verde, fibra óptica donde circula la luz transmitida, una mezcla de agua destilada y Óxido de Titanio que representa a la muestra, un fotodetector para convertir la respuesta óptica en señal eléctrica, circuito amplificador y luego un sistema de adquisición de datos utilizando Labview para obtener los valores numéricos del estudio y desarrollar la interfaz gráfica con el usuario final.*

**Palabras Claves:** Beer-Lambert, absorción, fotodetector, Óxido de Titanio.

## Abstract

*In this paper we show an implementation of a Detection and Measurement of Water Turbidity System using an Optical Fiber. For its development, it was necessary to study the Beer-Lambert Law, the Absorption of Electromagnetic Radiation Process, Scattering Particles in Water, also we study the different techniques of Scattering, wavelengths of the colors that were used as light source and all parameters associated with the optical fiber. This project used optical and electronic components; we designed a system which consists in a transmitter circuit comprised by red and green LED's and optical fiber where transmitted light circulates, distilled water and Titanium Oxide mixture which represent the sample, a photodetector which converts an optical response into an electrical signal, an amplifier circuit and finally a data acquisition system using LabView to obtain the numeric values for this study and to develop the graphical user interface.*

**Keywords:** Beer-Lambert, absorption, photodetector, Titanium Oxide.

## 1. Introducción

El agua tiene una función importante en los diversos ecosistemas existentes en el planeta Tierra, es de esta manera como se convierte en un elemento fundamental para el desarrollo de la vida. Hoy en día existen diferentes técnicas utilizadas para determinar en qué condiciones se encuentran los líquidos, estableciendo parámetros de suma importancia, entre ellas se encuentra la turbiedad del agua que determina la cantidad de sólidos suspendidos en el algún líquido; la turbiedad es un indicador de la calidad de agua en conjunto con el olor y sabor, según la OMS

(Organización Mundial para la Salud), en lo referente a la calidad del agua, la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU. [1]

El propósito del proyecto es implementar un sistema electrónico-óptico que detecte la cantidad de turbiedad existente en una mezcla de agua destilada con óxido de titanio y para esto hemos diseñado un sistema innovador con la ayuda del programa Labview para obtener los resultados requeridos.

## 2. Elementos Fotoeléctricos

### 2.1. Diodos Emisores de Luz

En las comunicaciones ópticas es necesario que las fuentes de luz sean estables y de larga duración.

Hoy en día es muy común utilizar los diodos LED en las comunicaciones con fibra óptica ya que son muy económicos y son los adecuados para transmisiones de datos a cortas distancias.

Técnicamente el LED es un dispositivo semiconductor que en presencia de una corriente eléctrica emite luz de manera directa; hay disponibles en diferentes colores o longitudes de onda, el color depende del material semiconductor utilizado cuando se construye el diodo; generalmente están contruidos con semiconductores inorgánicos como el Arseniuro de Galio Aluminio GaAlAs para longitudes de ondas cortas, y el Indio Galio Arsénico Fósforo InGaAsP para longitudes de ondas largas. [2]

### 2.2. Fotoemisores

Los fotoemisores son dispositivos que se comportan de tal manera que al estar sometidos a una corriente eléctrica o a una diferencia de potencial generan un haz de luz; estos transforman la energía eléctrica en luminosidad.

### 2.3. Fotodetectores

Los fotodetectores son dispositivos transforman señal luminosa en señal eléctrica.

Existen dos tipos de fotodetectores: los fotodiodos y los fototransistores. Para nuestro sistema hemos utilizado un fototransistor el cual es conocido como Foto-Darlington.

El Foto-Darlington es más sensitivo que los otros fototransistores debido a que tiene una ganancia mucho mayor, gracias a sus dos etapas de amplificación conectadas en cascada; cabe recalcar que por ser el más sensitivo su tiempo de respuesta es muy limitado y no sería de mucha utilidad para realizar transmisión de datos a grades velocidades.

## 3. Descripción del problema

La Turbidez o también conocido por Turbiedad es una de las características más importantes del agua, y es un parámetro indicador de contaminación de cualquier fluido (en nuestro caso tomaremos como referencia el agua). Es la

presencia de partículas que no permiten que el agua tenga la transparencia que la caracteriza debido a que éstas se encuentran en suspensión en la misma.

A medida que la turbidez fue una propiedad que se consideró para análisis de agua, se convirtió en una vía de prevención y detección de agentes externos (micro-organismos, partículas maliciosas), de esta manera, junto con la evolución de la tecnología se han logrado crear técnicas para la medición de esta propiedad.

Para el presente trabajo nos apoyaremos en los principios de espectroscopia en donde se incluye: proceso de absorción, ley de Beer Lambert como la base para el entendimiento del proyecto, y las diferentes técnicas analíticas de la dispersión en el agua en una solución de partículas suspendidas tales como la nefelometría y turbidimetría.

### 3.1. Proceso de absorción

La absorción de la radiación electromagnética es el proceso por el cual la radiación es captada por la materia, transfiriendo energía a la misma. [3]

### 3.2. Ley de Beer Lambert

Estudia fundamentalmente la absorción de la luz UV, visible e infrarroja en una muestra; la cual es un método matemático que se utiliza para expresar de qué modo la materia absorbe luz, esta ley nos permite establecer una relación entre la absorción de radiación y la concentración de la sustancia que absorbe en un medio conocido. [2]

La expresión matemática para relacionar dichos parámetros es la siguiente:

$$A = \epsilon dC = \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Donde A es la absorbancia,  $\epsilon$  es el coeficiente de absorción molar, d es la distancia en cm, C es la concentración e I es la intensidad de radiación transmitida por la muestra.

La Absorbancia también puede ir expresada en términos de intensidad de luz e indica que cuando en un cuerpo o material incide un haz de luz, parte de esta luz es absorbida por el cuerpo y el resto atraviesa dicho cuerpo. A mayor cantidad del luz absorbida, mayor cantidad de absorbancia en el cuerpo y menor cantidad de luz transmitida.

Existe otro factor llamado TRANSMITANCIA, que es la cantidad o fracción de la radiación incidente transmitida.

$$T = 10^{-A} \quad (2)$$

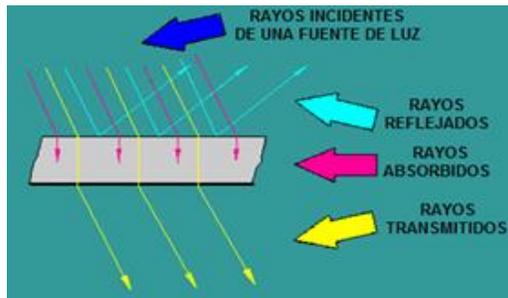


Figura 1. Rayos reflejados, absorbidos y transmitidos [4]

### 3.3. Dispersión de la luz en el agua

Existen dos técnicas analíticas que nos permiten estudiar el comportamiento de la dispersión de la luz en una solución de partículas suspendidas.

- Turbidimetría
- Nefelometría

En nuestro caso usaremos la turbidimetría ya que mide la disminución de la luz transmitida por el emisor a través de la muestra que contiene los sólidos suspendidos, que forma un ángulo con el rayo incidente. Se aplica este proceso cuando se tienen muestras con un gran número de partículas dispersantes.



Figura 2. Medición turbidimétrica y nefelométrica.

## 4. Implementación del Sistema de Detección y Medición de la Turbiedad del Agua

### 4.1. Diagrama de bloques del Sistema

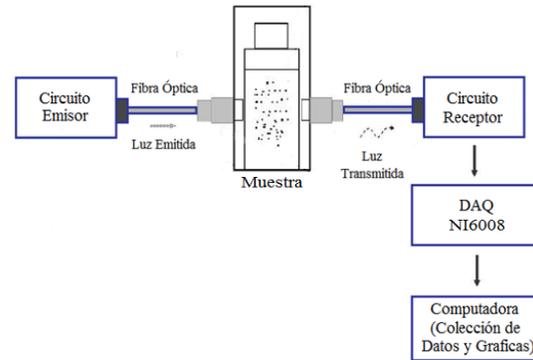


Figura 3. Diagrama de Bloques

Nuestro sistema está compuesto por cinco bloques como muestra la figura 3: un circuito emisor, muestra, circuito receptor, tarjeta de adquisición de datos NI6008 y PC; utilizando la fibra óptica plástica como medio de transmisión.

El circuito emisor está formado por dos fuentes de luz a diferente color uno Rojo y otro Verde, los cuales están representados por LED's emisores. Donde ambos LEDs trabajan con diferentes longitudes de onda, en la figura 4 se muestra un circuito equivalente del circuito emisor luego de un previo análisis matemático.

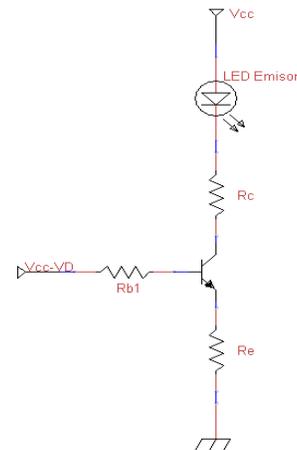


Figura 4. Circuito equivalente

La muestra es el bloque en donde se encontrará la solución de agua destilada con una concentración de Óxido de Titanio dentro de una cubeta de cuarzo.

El Circuito receptor se encuentra formado por tres etapas. La primera etapa (etapa de detección) consta por un fotodetector en serie con una resistencia y un LED indicador la misma que está representada en la figura 5.

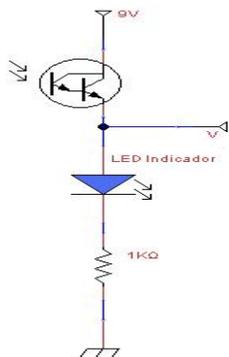


Figura 5. Etapa de detección

La segunda etapa (etapa de pre filtrado) consta de un filtro Pasa Bajos en conjunto a un seguidor de voltaje, representada por la figura 6.

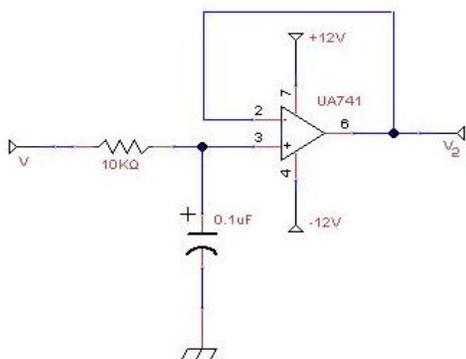


Figura 6. Etapa de Pre filtrado

La tercera etapa (etapa de amplificación) consta de un circuito de amplificación en donde luego de convertir la corriente a voltaje y de pasar por un proceso de filtrado se procederá a realizar una amplificación del mismo, está representada por la figura 7.

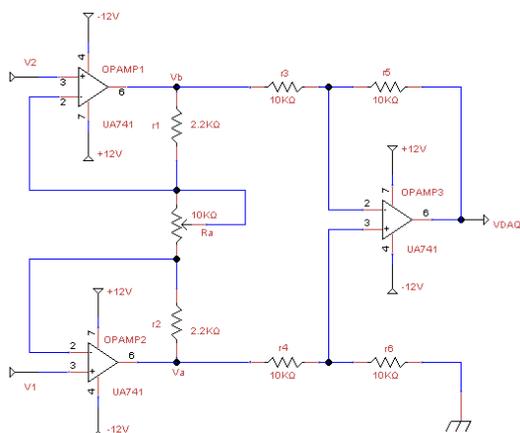


Figura 7. Etapa de amplificación

La DAQ NI6008 es la tarjeta con la cual realizaremos la recolección de datos iniciales para las curvas de calibración respectivas; así como también una vez ya desarrollada una aplicación servirá para la obtención de los datos finales.

La Colección de Datos y Gráficas es la programación que se realizará en una PC con ayuda del programa LabView en donde se desarrollará la aplicación de obtención de datos para la calibración y la aplicación que será para que el usuario final interactúe con el sistema.

## 4.2. Adquisición de datos

Para realizar la adquisición de datos utilizaremos la tarjeta NI6008. LabView será el programa que utilizaremos para recibir los datos a través de la tarjeta de adquisición de datos con ayuda del asistente de DAQ mismo que tomará el voltaje previamente amplificado y en base a una programación en lenguaje G (Graphic) determinará los valores de turbidez.

**4.2.1. Curvas de calibración.** Para poder obtener las curvas de calibración necesitamos realizar adquisición de datos de turbidez en un equipo específico y datos de voltaje de la misma muestra en nuestro sistema.

Hemos realizado pruebas a veinte muestras cada una de ellas con diferentes concentraciones de Óxido de Titanio diluidos en 100ml de Agua Destilada.

Se utilizó el equipo HACH 2100AN, figura 3.9, del Instituto de Ciencias Químicas en el Laboratorio de Aguas ESPOL-ULPGC-AECID. Utilizando la cubeta de cuarzo, colocamos parte de la muestra preparada dentro de la misma como lo muestra en la figura 8

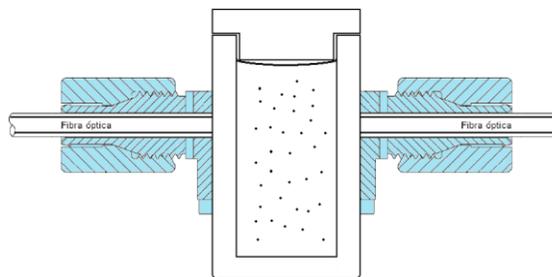


Figura 8. Cubeta con acople óptico

**4.2.2. Toma de datos de voltaje.** Hemos programado en LabView un “instrumento virtual” o “VI” llamado “Adquisición de Datos para Calibración”. También tomamos datos de voltaje con un multímetro FLUKE 77 SERIE II para hacer una comprobación de los datos adquiridos

por el “VI” con la tarjeta de adquisición de datos NI6008.

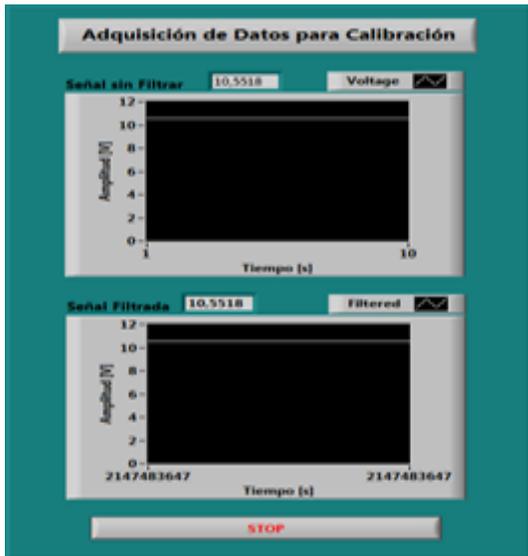


Figura 9. Adquisición de datos para calibración

En la figura 9 podemos observar la interfaz con el usuario para la adquisición de datos. Cuenta con dos indicadores un botón de Stop y dos cuadros de gráficas que muestran, en el primer cuadro la señal tal cual es adquirida desde la tarjeta de adquisición y en el cuadro posterior muestra la señal con un filtro con una frecuencia de corte de 10Hz (este filtro es programado desde LabView) después del asistente de adquisición de datos.

#### 4.3. Diagrama de bloques del sistema en Labview

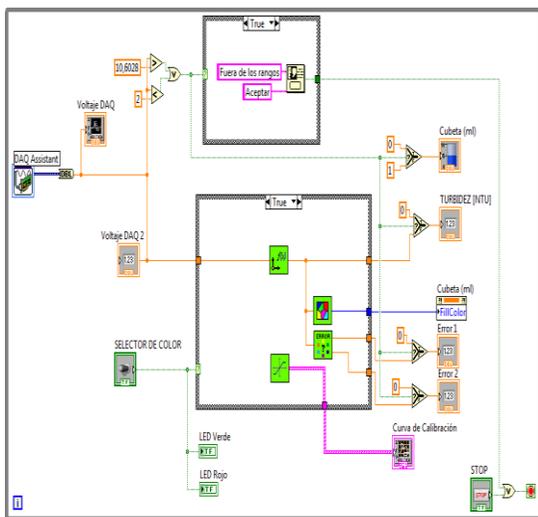


Figura 10. Diagrama de bloques del sistema en Labview.

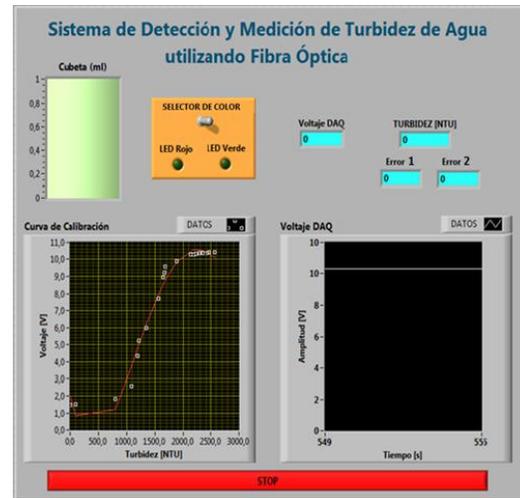


Figura 11. Interfaz gráfica final

Esta es la pantalla principal con la cual el usuario, jefe de laboratorio o personal encargado realizará la obtención y conversión de datos.

Como podemos observar en la figura 11, el panel frontal consta de un selector de color rojo o verde según del requerimiento.

Cuenta con un gráfico de la cubeta en donde podremos visualizar como la cubeta a medida de que la concentración de Óxido de Titanio es mayor ésta pierde el color de la alternativa de medición seleccionada.

A más de esto consta de un indicador en donde muestra los datos generados por la DAQ, es el valor real de voltaje que está detectando en ese instante.

En el panel se muestra el valor de turbidez generado, el Error 1 y Error 2, las dos gráficas en donde podemos encontrar la respectiva Curva de Calibración que dependerá del color escogido y la gráfica de Voltaje DAQ siendo sensado el voltaje en tiempo real. En la parte final encontraremos el botón de STOP para detener la simulación.

#### 5. Pruebas y Análisis de resultados

Realizaremos un análisis de la conversión de los datos medidos por la tarjeta de adquisición; de los valores obtenidos para la calibración del sistema y de los valores obtenidos una vez ya operativo el “VI” principal programado en LABVIEW.

Se realizaron, en 20 muestras, las pruebas de turbidez; con los datos obtenidos realizamos la curva de calibración respectiva a cada color. Cada muestra contenía una concentración de Oxido de Titanio de  $n$  [mg] en 100 [ml] de agua destilada. Se realizó hasta 5 veces la toma de datos.

En la tabla 1 se muestran los valores promedios de voltaje y turbidez medidos tanto del color verde como el color rojo.

**Tabla 1.** Valores promedio de voltaje y turbidez

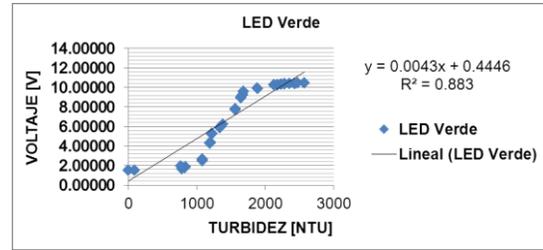
Concentración [mg]	Promedio Turbidez [NTU]	Promedio LED Verde [V]	Promedio LED Rojo [V]
0	0,1574	1,47179	1,5024
1,3	91,28	1,50036	1,893006
2,6	795,2	1,817078	2,611742
3,1	1077,4	2,60188	4,008498
5,2	1192,4	4,325468	5,585304
7,7	1217,8	5,250268	7,264936
10,4	1346,4	6,007396	8,933716
13,1	1560,2	7,748036	10,06982
15,2	1643,8	8,951086	10,12946
17,6	1665,4	9,198976	10,20898
20	1680,4	9,579212	10,3049
25,4	1884,6	9,888646	10,34938
30,7	2125,2	10,26488	10,5212
32,7	2176,8	10,27544	10,53908
35,2	2231,4	10,33138	10,55996
37,7	2281,8	10,35586	10,5824
40,4	2350,6	10,38248	10,60276
42,6	2429	10,39302	10,6028
45,3	2467,4	10,42328	10,6028
50,4	2568	10,43962	10,6028

Para realizar esta recolección de datos se tomó dos valores frontera, tales que puedan ser medibles tanto por el turbidímetro HACH 2100NA como por nuestro Sistema de Detección y Medición de Turbidez en el Agua utilizando la Fibra Óptica. Este valor fue producto de la mezcla de 50 mg de Óxido de Titanio y 100ml de agua destilada. Nuestro sistema fue el equipo que tuvo este valor como limitante debido a que con el color Rojo ya no era medible con la tarjeta de adquisición de datos.

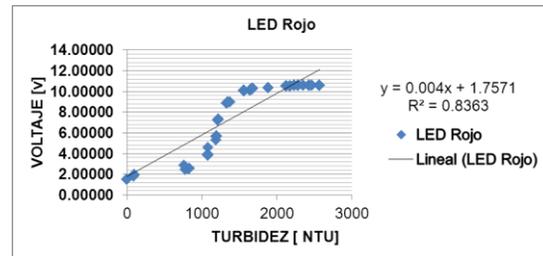
### 5.1. Análisis de Pruebas de Turbidez para Calibración

Para la realización de las curvas y para la conversión en el “VI” final se han utilizado los valores promedios de voltaje como de turbidez.

Para el desarrollo de este sistema una vez ya adquirido los valores para la calibración se procedió a realizar un estudio de regresión lineal mismo que nos dio estos resultados.



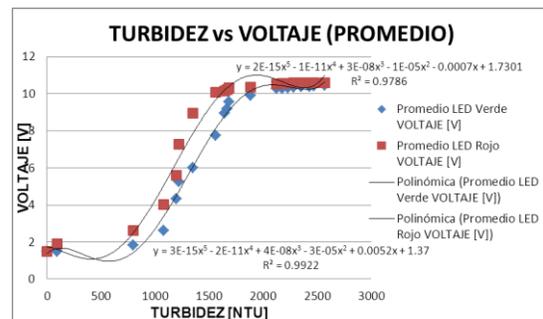
**Figura 12.** Regresión Lineal LED Verde



**Figura 13.** Regresión Lineal LED Rojo

Como podemos observar en las figuras 12 y 13 cada color presenta su función lineal ajustada, misma que va acompañada de un factor R<sup>2</sup>, este valor nos indica que tan preciso es el ajuste de la recta a los datos; mientras más se aproxima a 1 es mejor el ajuste lineal.

A pesar que los valores R<sup>2</sup> del ajuste lineal son superiores a 0.8 a simple vista se observa que la aproximación lineal no es la más apropiada para representar las variables, debido a la respuesta no lineal del sistema. Por esto se realizó un análisis polinomial; mientras mayor sea el grado de la función, mejor es el ajuste polinomial. A continuación observaremos el ajuste polinomial realizado con los valores promedios.



**Figura 14.** Ajuste polinomial de grado 5

La figura 14 nos muestra el Ajuste polinomial realizado en ambos colores (LED Rojo, LED Verde) utilizando los promedios. Podemos observar en las funciones generadas los valores de R<sup>2</sup> respectivamente; estos valores son muy cercanos a 1, para color rojo el R<sup>2</sup> es 0.9786 y para color verde el R<sup>2</sup> es 0.9922. Es por esto que para el desarrollo de este sistema de detección y

medición de turbidez se seleccionó el método de ajuste polinomial para la conversión de los datos de voltaje a turbidez.

## 5.2. Pruebas de Turbidez de Nuestra Aplicación

Una vez ya preparada la muestra se procede a abrir la aplicación creada “test principal” se presiona la tecla *RUN* en LabView y con esto se encuentra operativo. Si se requiere cambiar de color Rojo a color Verde con el selector que muestra el panel frontal de la aplicación se lo puede realizar; no es necesario detener la simulación para realizar el cambio de color.

Físicamente el cambio de color se realiza con el interruptor que tiene circuito emisor. Debido a que solo tenemos una sola fibra del circuito emisor se procede a cambiar la misma hacia el otro LED. En este caso, primero apagamos el sistema físico y luego de realizar el cambio de la fibra; posterior a estos pasos enciende el sistema y se selecciona el color.

## 5.3. Análisis Pruebas de Turbidez de Nuestra Aplicación

Hemos realizado dos muestras una de ellas que contiene 38 mg de óxido de titanio diluidos en 100 ml de agua destilada, la cual se encuentra dentro de los rangos y va a ser medida por nuestro sistema; y la otra prueba que contiene 2mg de óxido de titanio diluidos en 100 ml de agua destilada, la cual se encuentra fuera de los rangos establecidos por nuestro sistema. Para ambas muestras se ha realizado la toma de datos con ambos colores (color rojo y color verde).

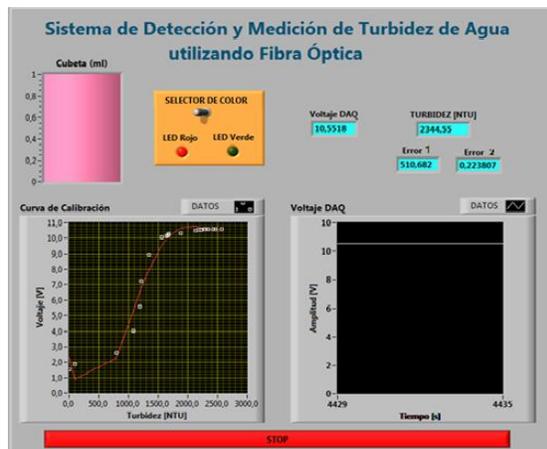


Figura 15. Muestra 38mg – color rojo

**5.3.1. Muestra de 38 mg.** Como podemos observar en el panel frontal de la figura 15 el valor detectado por la DAQ es de 10,5518 V, mismo que se convierte en el valor estimado de 2344,55 NTU. También podemos observar esta aproximación en la gráfica de Curva de Calibración. El error absoluto es 510.682 y el relativo es 0.223807, estos valores son los errores en el sensor donde se encuentra este punto.

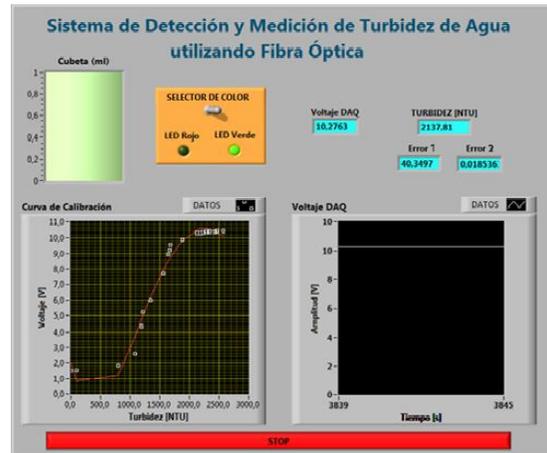


Figura 16. Muestra 38mg – color verde

La figura 16 el valor detectado por la DAQ es de 10,2763 V, mismo que se convierte en el valor estimado de 2137,81 NTU. También podemos observar esta aproximación en la gráfica de Curva de Calibración. El error absoluto es 40.3497 y el relativo es 0.018536, estos valores son los errores en el sector donde se encuentra este punto.

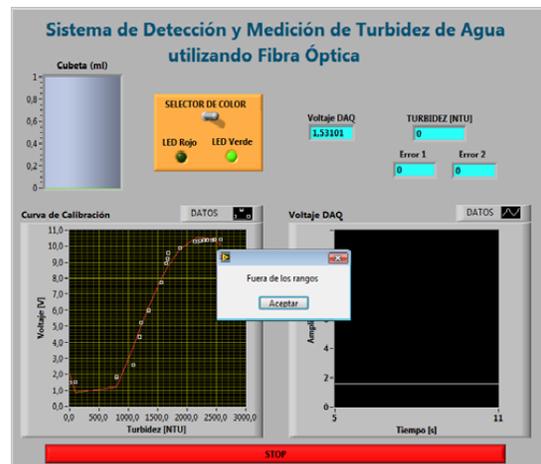


Figura 17. Muestra 2mg – color verde

En la figura 17 el valor detectado por la DAQ es de 1,54322 V. Como podemos observar presenta un mensaje de error indicando que el valor detectado por la tarjeta NI6008 no se

encuentra dentro de los rangos establecidos. En el capítulo anterior se estableció que los rangos limitantes son 2 V como valor mínimo y 10.6028 V como valor máximo; el valor máximo es tomado como límite que presenta la tarjeta para adquirir datos, el valor mínimo puesto que como se observa en las curvas de calibración de ambos colores es en donde la gráfica presenta un codo (es en donde los errores absolutos y relativos son extremadamente altos).

Presenta el mismo resultado de la figura 17 cuando se trabaja con el color rojo.

#### 5.4. Análisis final

Al realizar la prueba con la muestra que contenía 38mg de Óxido de Titanio podemos observar las diferencias notables que presentan en los valores detectados de voltaje. Esto se debe a que ambos están trabajando a diferentes potencias.

Con los datos obtenidos pudimos observar que tenía mayor respuesta (rango) al utilizar el LED verde el cual está operando con una longitud de onda de 530nm inferior a la longitud de onda en la que está operando el LED rojo (660nm).

En las pruebas con el LED rojo se pudo observar que éste se atenuaba más que al realizar con la misma muestra la prueba con el LED verde. Los rangos establecidos fueron fijados bajos las limitantes que presentaba el mismo sistema físico. El valor mínimo que detectaba el fotodetector es de 1.48 V, valor ya amplificado adquirido cuando la cubeta se encontraba sin muestra.

El valor máximo que detectaba la tarjeta de adquisición de datos NI6008 era de 10.6928 V. A pesar de que este valor era límite en la tarjeta de adquisición de datos se continuó adquiriendo datos con un multímetro digital; este presentó un valor límite de 11.583 V.

En el desarrollo de este sistema fue importante realizar un estudio acerca de la sensibilidad del fotodetector por esto se escogió el fotodarlington IFD93 el cual tiene velocidad de respuesta lenta (ms) pero es muy sensitivo, su responsividad se encuentra entre los 200 $\mu$ A para longitudes de onda de 632nm.

#### 6. Conclusiones

1. Los LED's que utilizamos son: LED verde IFE93 y el LED rojo 08IFE96 los cuales hemos escogido debido a que tienen una diferencia en longitud de onda de 130 nm, cada uno con una longitud de onda de  $\lambda_p=530$  nm y  $\lambda_p=660$  nm respectivamente. Además utilizamos en el receptor el fotodiodo IFD93 mismo que fue

seleccionado de entre tres fotodetectores por ser el que tenía mayor sensibilidad en este medio guiado, tomando en cuenta las características de cada uno de ellos; así pudimos descubrir la mejor opción, la misma que fue destinada en la implementación del equipo llevándonos a obtener los resultados esperados luego de un gran estudio experimental.

2. Con las pruebas realizadas en el Instituto de Ciencias químicas en el Laboratorio de Aguas ESPOL-ULPGC-AECID con las muestras formadas por óxido de titanio y agua destilada en conjunto con nuestro equipo y el multímetro digital, pudimos notar que los datos tenían concordancia en cuanto a Voltaje, Turbidez y Concentración respectivamente, a mayor concentración de óxido de titanio mayor valor de turbidez y por ende mayor voltaje, la relación se dio directamente proporcional.

3. Para elegir el material al cual se iba a realizar el estudio de turbidez y su curva de calibración, elegir la mejor opción para formar la muestra, logramos usar el óxido de titanio con el agua destilada ya que era el material que se diluía con facilidad y que nos permitía tener mejores resultados. La arcilla tenía un tiempo muy limitado en el cual se asentaba y no permitía buenos resultados, los valores de turbidez de turbidímetro 2100NA diferían en grandes cantidades.

#### 7. Referencias

- [1] Presidencia de la República, Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, <http://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>, 2005.
- [2] Ghatak Ajoy, Thyagarajan K., Introduction to Fiber Optics, Cambridge University, Junio de 1998.
- [3] Daniels, "Fisicoquímica", CECOSA, (1972), páginas 683-703.
- [4] Navy Electricity and Electronics Training Series, Module 24 - Introduction to Fibers Optics, ETCS(SW) Donnie Jones, Septiembre 1998.
- [5] EXCEL WATER Technologies INC. La Historia del Tratamiento del Agua de Tomar, [http://www.excelwater.com/spa/b2c/about\\_7.php](http://www.excelwater.com/spa/b2c/about_7.php)
- [6] La Guía MetAs, Medición de Turbidez en la Calidad del Agua, <http://www.metas.com.mx/guiamet/La-Guia-MetAs-10-01-Turbidez.pdf>, Enero de 2010.

- [7] Rodríguez García José, Fundamentos de Óptica Geométrica, Universidad de Oviedo, 1997.
- [8] Purves, W.K., Orians, G.H., and Heller, H.C. Life: The Science of Biology, 4th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, 1995.
- [9] IBERCordones Pretensados,S.L., Acero Pretensado – Pigmentos Inorgánicos – Dióxido de Titanio, <http://www.ibercordones.com>, 2011.
- [10] Levine Ira N., Fisicoquímica Volumen 2, Editorial McGraw Hill, Quinta edición, 2004.