

## **Proyecto final de carrera: Modernización y reacondicionamiento de un espectrofotómetro visible de simple haz**

Brian P. Flech<sup>a</sup>, Cesar E. Rebak<sup>a</sup>, Matias G. Krujoski<sup>a</sup>, Ricardo E. Korpys<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: brianflech@gmail.com, rebakimanu@gmail.com

---

### **Resumen**

En este trabajo se presentan los avances en el reacondicionamiento y modernización de un espectrofotómetro de haz simple. El objetivo del proyecto es mejorar el rendimiento y la funcionalidad del espectrofotómetro mediante la incorporación de tecnologías y componentes más avanzados. En primer lugar, se realizó una revisión exhaustiva del estado inicial del espectrofotómetro. Se identificaron los problemas y limitaciones que presentaba el equipo en su forma original, destacando la necesidad de actualizar varios de sus elementos para mejorar su precisión y confiabilidad. En el proyecto se contemplan varias etapas, entre las cuales podemos mencionar el reemplazo de componentes obsoletos, identificación y sustitución de las piezas y componentes obsoletos que afectan el rendimiento del espectrofotómetro. Esto incluyó el reemplazo de lámparas, detectores y elementos ópticos, actualización de la electrónica y software, se diseñó e implementó una nueva electrónica y software para mejorar la precisión de las mediciones y permitir una interfaz más amigable con el usuario. Se agregaron funcionalidades de calibración automática y corrección de desviaciones para asegurar la fiabilidad de los resultados.

**Palabras Clave** – Espectrofotómetro, modernización, reacondicionamiento, detector, transmitancia, absorbancia.

### **1 Introducción**

El desarrollo de este proyecto final de carrera, se realiza en el marco de la materia “Proyecto y Diseño Electrónico”, tiene como objetivos articular y operativizar los conceptos aprendidos durante toda la carrera de Ingeniería Electrónica.

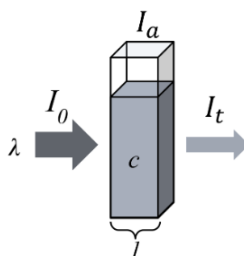
El propósito de este trabajo es, a partir de un Espectrofotómetro antiguo y obsoleto que estaba almacenado en la facultad, realizar una investigación acerca del equipo y su funcionamiento, así como determinar el estado del mismo. Asimismo, para el trabajo se plantea realizar una nueva, rediseñada y modernizada electrónica para el equipo, y así dejarlo operativo nuevamente como instrumento de docencia y apoyo a la investigación.

La espectrofotometría es uno de los métodos de análisis más usados que se basa en la relación que existe entre la absorción de luz por parte de un compuesto y su concentración. Cuando se hace incidir luz monocromática, es decir, de una sola longitud de onda, sobre un medio homogéneo, una parte de la luz incidente es absorbida por el medio y la otra es transmitida, como consecuencia, la intensidad del rayo de luz será atenuada, desde el punto incidente de la muestra y a lo largo de la misma.

Por lo tanto, el espectrofotómetro es un instrumento que mide la cantidad de luz que absorbe una muestra haciendo pasar un haz a través de esta para medir la transmitancia y la absorbancia.

### 1.1 Transmitancia y absorbancia

Cuando un rayo de luz de una determinada longitud de onda de intensidad  $I_0$  incide perpendicularmente sobre una solución de un compuesto químico que absorbe luz, el compuesto absorberá una parte de radiación incidente  $I_a$  y dejará pasar el resto  $I_t$ , como se muestra en Fig. 1.



**Fig. 1. Esquema gráfico de transmitancia.**

La **transmitancia** ( $T$ ) de una sustancia es la relación entre la cantidad de luz transmitida que llega al detector una vez que ha atravesado la muestra ( $I_t$ ) y la cantidad de luz que incidió sobre ella ( $I_0$ ) y se representa normalmente en tanto por ciento:

$$T_{\%} = \frac{I_t}{I_0} \cdot 100 \quad (1)$$

La transmitancia ofrece una medida física de la relación de intensidad incidente y la transmitida al pasar por la muestra. La relación entre  $\%T$  y la concentración no es lineal, pero asume una relación logarítmica inversa.

La **absorbancia** ( $A$ ) es un concepto más relacionado con la muestra puesto que nos indica la cantidad de luz absorbida por la misma, y se define como el logaritmo de  $1/T$ , en consecuencia;

$$A = \log\left(\frac{1}{T}\right) = -\log(T) = -\log\left(\frac{I_t}{I_0}\right) \quad (2)$$

Cuando la intensidad incidente y transmitidas son iguales ( $I_0 \equiv I_t$ ), la transmitancia es del 100 % e indica que la muestra no absorbe a una determinada longitud de onda, y entonces  $A$  vale  $\log(1) = 0$ . La cantidad de luz absorbida dependerá de la distancia que atraviesa la luz a través de la solución del cromóforo y de la concentración de éste.

## 2 Desarrollo

### 2.1 Relevamiento del estado del equipo

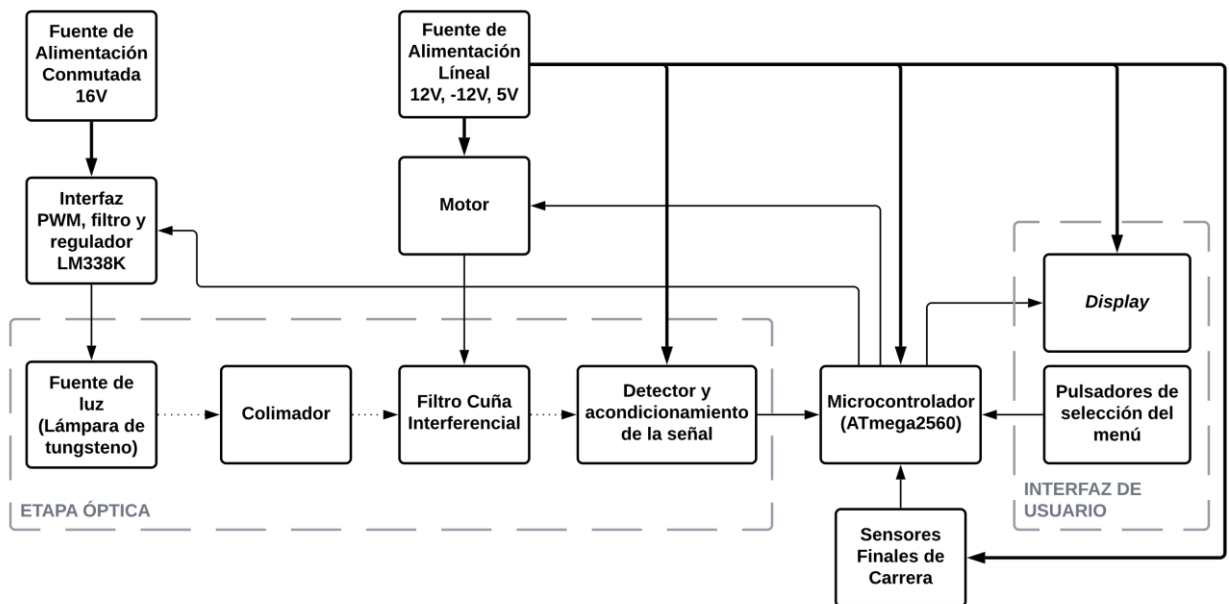
Se trata de un Espectrofotómetro de simple haz modelo 414 de la empresa argentina Crudo Caamaño, el equipo es el que se visualiza en la Fig. 2.



**Fig. 2. Espectrofotómetro Crudo Caamaño Mod. 414 de simple haz.**

El equipo se encontraba en un estado obsoleto, con electrónica de mucha antigüedad y deteriorada, había sido reparado en varias ocasiones, pero seguir reparándolo ya no era posible. Realizando un análisis exhaustivo de cada parte interna del mismo, determinamos que las siguientes partes quedaron obsoletas o que ya no se pueden volver a utilizar: transformador, fuente (filtrado y rectificación), detector (sensor principal), etapa de sensado y acondicionamiento de la señal del sensor, etapa de potencia (que controlaba la lámpara). Dentro de las partes que se identificaron como factibles de reutilizar tenemos: filtro (cuña interferencial 400 – 700nm), lente cóncavo (concentra los rayos de luz proveniente de la lámpara) y la estructura mecánica interna, así como también la carcasa metálica original y el receptáculo para cubas de muestra.

### 2.2 Diagrama de bloques general



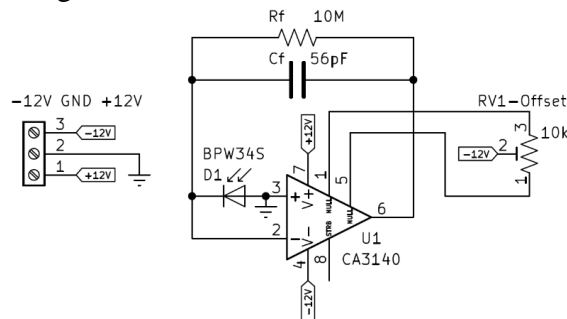
**Fig. 3: Diagrama de bloques de las partes y subsistemas del equipo.**

En el presente se aprecia claramente las conexiones que hay entre las diferentes partes del equipo con sus respectivas fuentes de alimentación.

### 2.3 Etapa Óptica

#### 2.3.1 Rediseño del Detector

Un circuito básico para convertir la señal de corriente producida por el detector a una señal de tensión es el que se muestra en Fig. 4 [1].



**Fig. 4. Circuito detector con ajuste de offset.**

Un fotodetector clásico utiliza un fotosensor, un fotodiodo de silicio para convertir la luz en una corriente de valor pequeño. Esta corriente pequeña, debe ser convertida a un voltaje utilizable y para ello, se utiliza un amplificador operacional.

Los componentes imprescindibles de un circuito fotodetector son el fotodiodo, un amplificador operacional que tiene entradas de alta impedancia (corriente de polarización de entrada mínima), una resistencia de retroalimentación  $R_f$  y un condensador de retroalimentación de estabilización  $C_f$ , cómo puede apreciarse en la Fig. 4.  $R_f$  puede variar desde el orden de kilo-ohmios ( $k\Omega$ ) a decenas de giga-ohmios ( $G\Omega$ ), siendo lo suficientemente alta como para convertir la corriente del fotodiodo al rango de voltaje de entrada del amplificador operacional. El valor de  $C_f$  depende de la relación entre el ancho de banda del amplificador, la capacitancia de entrada y la capacitancia del fotodiodo parásito y debe estar en el orden de unos pocos picofaradios ( $pF$ ).

La señal de salida de este detector, será ingresada en una placa de desarrollo Arduino MEGA con microcontrolador ATmega2560, mediante un puerto analógico para luego ser procesada digitalmente y hacer los cálculos de Transmitancia y Absorbancia mencionados anteriormente.

#### 2.3.2 Fuente de Luz

Para la fuente de luz optamos por reemplazar la lámpara original que se encontraba quemada por una con las mismas características técnicas; es decir, lámpara incandescente de filamento de tungsteno de 15 W y 12 V.

### 2.4 Etapa de Potencia

Esta etapa es la encargada de controlar la intensidad de la lámpara, hemos planteado un circuito de control de intensidad lumínica mediante el uso de PWM (*Pulse width modulation*, por sus siglas en inglés) que es generado por el microcontrolador en forma nativa, de esta manera, este control será realizado por el usuario en forma digital mediante una modificación en el ciclo útil de la señal PWM

de manera implícita, ya que el usuario en realidad tendrá un “control de intensidad” de la lámpara [2].

Para convertir la señal de corriente alterna (AC) de onda cuadrada del PWM a una señal de corriente constante (CC), utilizamos como interfaz y, *buffer* de corriente, el regulador de voltaje lineal LM338K. Asimismo, este cumple un rol adicional de actuar como filtro baso bajo, para evitar las componentes generadas en las altas frecuencias por la señal en cuestión.

#### *Automatización*

Una mejora propuesta para el equipo es la de automatizar el desplazamiento del filtro cuña interferencial, característica que originalmente era manual (con perilla). Una de las maneras de hacer esto es mediante un motor PaP (paso a paso), puesto que estos motores son de gran precisión. El control del motor se realiza mediante un *driver* (controlador) A4988 según [3].

Además, se adicionaron sensores ópticos como finales de carrera para establecer los límites del desplazamiento del filtro cuña interferencial.

Los primeros ensayos del automatismo del desplazamiento se realizaron de modo de contar la cantidad de pasos totales que hay desde el comienzo del filtro hasta el final (400 a 700 nm) para las diferentes configuraciones de micro pasos que pueden configurarse en el driver. Estos resultados se muestran en la Tabla 1, se ensayaron 10 veces con cada configuración de micro paso para ver las posibles variaciones.

**Tabla 1. Cantidad de pasos entre 400 y 700 nm.**

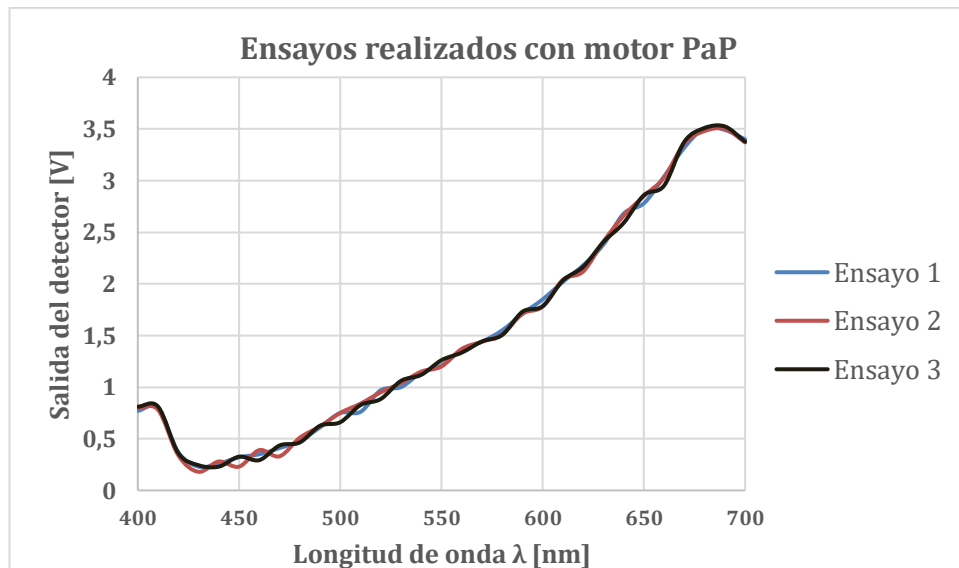
<b>Resolución</b>	<b>Cant. Pasos</b>
Pasos completos	2254
½ paso	4486
¼ paso	8985

Con estos datos, podemos determinar tanto la precisión que tendrá el desplazamiento del filtro realizado con el motor como obtener el error de posición, teniendo en cuenta la variación de pasos para las 3 resoluciones presentadas anteriormente, las cuales presentaron  $\pm 2, 4, y 8$  pasos respectivamente. Sabiendo que en el rango del filtro hay 300 nm totales. Realizamos los siguientes cálculos que se observan en la tabla.

**Tabla 2. Precisión y error del desplazamiento con motor.**

<b>Resolución</b>	<b>Precisión</b>	<b>Error</b>
Pasos completos	$2254 \text{ pasos}/300 \text{ nm} \approx 7,5133 \text{ pasos/nm}$	$Error = \frac{2256 - 2254}{2256} < 0,1 \%$
½ paso	$4486 \text{ pasos}/300 \text{ nm} \approx 14,9533 \text{ pasos/nm}$	$Error = \frac{4490 - 4486}{4490} < 0,1 \%$
¼ paso	$8985 \text{ pasos}/300 \text{ nm} \approx 29,95 \text{ pasos/nm}$	$Error = \frac{8993 - 8985}{8993} < 0,1 \%$

Hemos realizados 3 ensayos diferentes utilizando el desplazamiento con el motor. Los valores tomados por el detector del equipo se ingresaron por una entrada analógica del microcontrolador y se obtuvieron por medio del puerto USB de una computadora, y así obtener directamente los datos sobre un *software* capaz de leer los datos por medio del puerto serial del microcontrolador. En la Fig. 5 se muestran varias curvas obtenidas en el ordenador.



**Fig. 5. Ensayos realizados desplazando filtro con motor PaP.**

### 2.5 Procesamiento de Datos

El procesamiento de las señales se realiza con el microcontrolador (ATmega2560), realizando la lógica correspondiente para cada etapa del equipo. De las cuales, podemos mencionar a continuación; Se utilizan los puertos digitales para:

- Realizar el control de motor paso a paso, donde es necesario utilizar 3 pines digitales, los cuales son, generador de pasos del motor, la dirección (giro directo o invertido) y, también, la activación del *driver*, es decir, habilitarlo cuando sea necesario usarlo y así evitar consumo de corrientes innecesarias.
- Las señales de sensores finales de carrera, las cuales se utilizan para indicar los límites de desplazamiento del filtro cuña interferencial.

Puertos analógicos para:

- El sensado de señal de detector principal (conversión de señal de voltaje analógico a valor digital). Este valor se utiliza para realizar los cálculos necesarios para obtener la transmitancia y observancia de la muestra ensayada.
- El sensado de temperatura, para controlar la temperatura interna en el equipo a la cual se han realizado los ensayos.

Por otro lado, la interfaz de usuario para configuración de los parámetros de ensayos será mediante un *display* (pantalla) de 3,5 pulgadas y la utilización de botones para interactuar por los diferentes menús que se presenten en la misma. Esta pantalla también hace uso de los puertos digitales del microcontrolador, así como también, los botones a utilizar.

### 3 Conclusiones

En el proyecto de reacondicionamiento y modernización del espectrofotómetro de haz simple, se ha logrado actualizar la electrónica y así obtener mejor rendimiento en cuanto a visualización de resultados, tiempos de ensayos y una interfaz gráfica para facilitar la interacción intuitiva entre el usuario y el sistema. Por otro lado, en cuestiones de consumo energético, no obtenemos una gran diferencia del equipo anterior, debido a que la fuente de luz es similar. A través del análisis minucioso de sus componentes y tecnologías obsoletas, se identificaron las áreas clave que requerían mejoras para llevar a cabo mediciones precisas y confiables.

La sustitución de componentes obsoletos, la actualización de la electrónica y el software, la incorporación de adquisición de datos y automatización, y las pruebas rigurosas para verificar su rendimiento, han llevado a un espectrofotómetro altamente mejorado y adaptable a las necesidades para las que fue diseñado.

La precisión y la reproducibilidad de las mediciones han sido mejoradas considerablemente, lo que lo convierte en una herramienta esencial en aplicaciones científicas y químicas. La automatización y la interfaz de usuario más amigable optimizarán el manejo del equipo, lo que permite un uso más sencillo y eficiente inclusive, para usuarios no expertos.

Este proyecto demuestra que, el reacondicionamiento y la modernización de un equipo electrónico pueden ser estrategias valiosas para prolongar la vida útil de equipos científicos y analíticos, reducir costos en comparación con la adquisición de equipos nuevos y, al mismo tiempo, mejorar su rendimiento. Los resultados obtenidos en este informe resaltan la importancia de mantenerse actualizado con las últimas tecnologías en el campo de la espectrofotometría y otras áreas científicas relacionadas.

### Referencias

- [1] Bonnie Baker, "Cómo implementar un circuito de detección espectrofotométrica de alta sensibilidad", *Colaboración de Editores de DigiKey, América del Norte*, Julio. 2019.
- [2] Aruna Rubasinghe, "Control an LM317T with a PWM signal", *Ingirya Sri Lanka*, Feb. 2011.
- [3] Fransisco Pons, "Control de motor paso a paso con Arduino y pololu A4988", *España*, Mar. 2017.