

Sistemas de Adquisición de Datos Aplicados en la Medición de Variables Físicas

JONATHAN FIALLOS ¹, RENÉ DAVID HERNÁNDEZ ², ROGER PONCE ³, AND ROBERTO MEJÍA ⁴

¹Escuela de Física - Universidad Nacional Autónoma de Honduras, mail: jonathan.fiallos@unah.edu.hn

²Escuela de Física - Universidad Nacional Autónoma de Honduras, mail: rene.hernandez@unah.edu.hn

³Escuela de Física - Universidad Nacional Autónoma de Honduras, mail: rponce@unah.edu.hn

⁴Escuela de Física - Universidad Nacional Autónoma de Honduras, mail: roberto.mejia@unah.edu.hn

Recibido: 2 de Octubre de 2017 / Aceptado: 22 de Noviembre de 2017

Resumen

A model for a low-cost, high resolution data gathering system construction is being presented, using a sensor, a microcontroller and an analog to digital signal converter. Using this scheme, two systems were designed, one for measuring temperature and a second one for measuring luminous intensity variations from a LASER. Each system is described from its theoretical point of view and experimental approach. For the digital thermometer implementation a Steinhart-Hart calibration was considered and to verify the correct functioning of the photodetector system, the Malus Law was considered.

Keywords: Digitalization, Data Gathering System, Analog-Digital Converter, Digital Signals, Analog Signals.

Se presenta un modelo para la construcción de un sistema de adquisición de datos de bajo costo y alta resolución, utilizando un sensor, un microcontrolador y un conversor analógico digital. Utilizando este esquema se realizaron dos sistemas, uno para medir temperatura y un segundo para medir variaciones de la intensidad luminosa de un láser. Cada sistema es descrito desde su punto de vista teórico y propuesta experimental. Para la implementación del termómetro digital se consideró una calibración de Steinhart-Hart y para verificar el funcionamiento del sistema fotodetector, se consideró la Ley de Malus.

Palabras clave: Digitalización, Sistema de Adquisición de Datos (SAD), Conversor Analógico Digital (CAD), Señales Digitales, Señales Analógicas.

PACS: 07.05.Fb; 07.05.Hd

I. INTRODUCCIÓN

LA física es una disciplina de carácter altamente experimental, teniendo especial cuidado en el uso de instrumentos que nos permitan medir variables físicas con alta precisión y exactitud. Estas dos cualidades se pueden lograr mediante el uso de buenos instrumentos de medición, los cuales tienden a elevar su costo a medida que estos mejoran.

En este documento se presenta una forma de obtener mediciones con buena precisión, mediante la construcción de un sistema electrónico de bajo costo. El modelo utilizado para realizar dicho sistema puede ser utilizado para cuantificar distintos fenómenos físicos.

El modelo del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) que se presenta, permite fomentar el uso de instrumentos de medición con una adecuada precisión con el beneficio de obtenerlo a un costo bajo y versatilidad.

II. DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES

Un SAD obtiene valores de variables físicas mediante el uso de sensores. Los sensores son dispositivos electrónicos con los que a partir de la energía del medio donde se mide, se obtiene una señal de salida transducible que es función de la variable medida, en otras palabras son dispositivos capaces de relacionar los cambios de una señal de salida de origen eléctrico que dependen de los cambios de una señal de entrada (no necesariamente la señal debe ser eléctrica, esta puede ser una señal mecánica, óptica, química, térmica, etc.).

Diversos sensores, en muchos casos, ofrecen una señal análoga de salida; las señales análogas presentan desventajas como la susceptibilidad de ser modificadas de manera no deseada mediante ruido; para un mejor manejo de datos se prefieren las señales digitales, que presentan ventajas notables con respecto a las análogas, disminuyendo el ruido al máximo.

Debido a lo mencionado anteriormente se procura mane-

jar señales digitales, lo que implica que la señal analógica proveniente de los sensores a utilizar debe ser transformada en una señal digital o discreta.

Los principales aspectos en la digitalización de una señal son:

- **Muestreo:** En términos generales, el proceso de muestreo consiste en tomar valores de la señal analógica a intervalos de tiempo constantes. Se deben tomar ciertas precauciones para asegurarse que la señal de salida no cambie significativamente. Por tanto, al muestrear la señal analógica a intervalos discretos $T_s = 1/f_s$, la frecuencia de muestreo f_s debe ser elegida cuidadosamente para asegurar una representación precisa de la señal original. Es evidente que entre más muestras se tomen, más precisa será la representación digital. También es importante considerar el Teorema de Nyquist, el cual indica que es posible reconstruir una señal analógica a partir de muestras periódicas siempre que la tasa de muestreo sea al menos el doble de la frecuencia más alta contenida en la señal [8].

$$f_s > 2f_{max} \quad (1)$$

- **Cuantificación:** Este proceso ocurre paralelamente al muestreo. Consiste en medir el valor de la muestra y asignarle un valor discreto en una escala de valores posibles, esto último es, dividir el rango de amplitudes en un número limitado de intervalos o niveles de cuantificación [3]. El número de niveles N dependerá del número de bits n utilizados para expresar el valor de la muestra de la siguiente forma:

$$N = 2^n \quad (2)$$

Las amplitudes se normalizan al valor de la altura de los intervalos y las muestras toman los valores cuantificados que se fijan en el punto medio de cada intervalo.

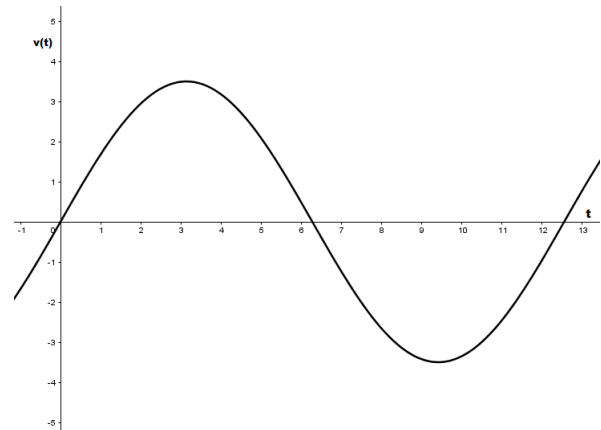
Como esta parte del proceso consiste en una aproximación, los valores de salida son aproximados, lo cual produce lo que se le llama *Error de Cuantificación*, el cual puede disminuirse al aumentar el número de bits.

- **Codificación:** En esta etapa se representan las muestras cuantificadas mediante una secuencia binaria de unos y ceros.

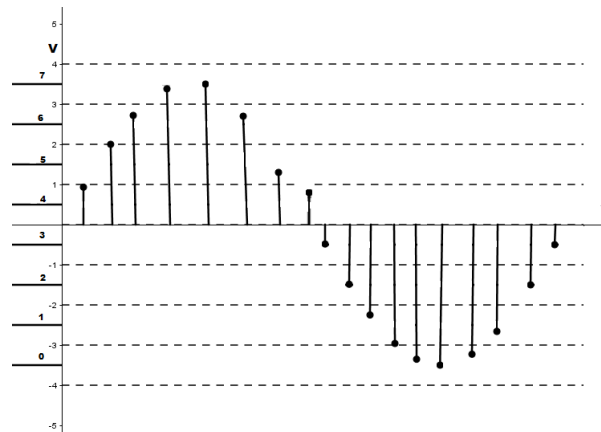
En general existen dispositivos que permiten la conversión de señales analógicas a digitales, estos dispositivos reciben el nombre de: Convertidores analógico-digital con siglas CAD o ADC por sus siglas en Inglés.

III. CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL

Un ADC es un arreglo de componentes electrónicos que tiene puertos de entrada, salida y alimentación eléctrica;



(a) Señal Analógica



(b) Señal Discreta (Muestras)

Figura 1: a) Se muestra la señal analógica de entrada a ser digitalizada o discretizada. b) Se ilustra cada uno de los intervalos de cuantificación delimitados por las líneas punteadas y los valores cuantificados señalados con las líneas continuas. Esto ilustra una conversión a 3 bits.

donde la entrada corresponde una señal analógica y la salida a una señal digital correspondiente a la conversión de la señal de entrada.

Existen varios tipos de ADC's, los cuales se pueden clasificar según la modulación que utiliza:

- Modulación por Rampa
- Modulación por Aproximaciones sucesivas
- Modulación por memoria Flash
- Modulación por Pipe-Line
- Modulación Delta
- Modulación por tiempo de pulso
- Modulación Sigma-Delta

Se propone utilizar el ADS 1115, dada la relación resolución-precio porque existen ADC's con mayor resolución pero a un precio más elevado.

A. ADS1115

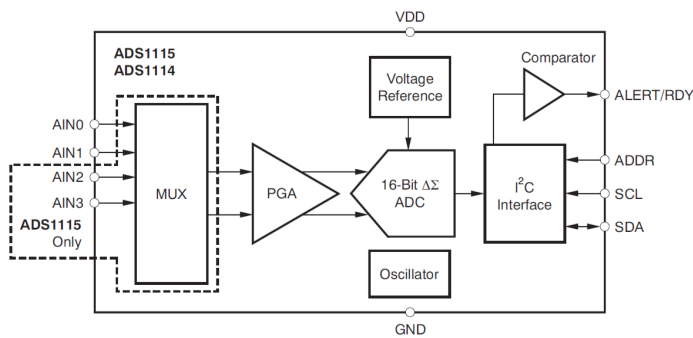


Figura 2: Esquema del ADS 1115 . Figura recuperada de [9]

La resolución de este ADC es de 16 bits a 860 muestreos por segundo utilizando el protocolo de comunicación I2C. Tiene 10 pines; 2 corresponden a la alimentación eléctrica: VDD, donde se conecta un voltaje (de 3.3-5 volts), y GND que corresponde a la conexión a tierra [9]; los pines SDA (sincronización de datos) y SCL (sincronización de reloj) se encargan de la comunicación entre el ADS1115 y el microcontrolador que procesa la señal; tiene 4 pines de entrada analógica nombrados A0, A1, A2, A3; los últimos dos pines son el ADDR y ALRT. El uso del pin ADDR dependerá del modo de funcionamiento del ADS1115, en el modo con una conexión este pin se conecta con el nodo tierra. Finalmente, el pin ALRT se puede utilizar para verificar en tiempo real la transmisión de datos.

Existen dos maneras de conectar el ADS1115, estas son a *Conexión Única* y *Conexión Diferencial*, donde la diferencia entre ambas conexiones radica en el número de pines conectados. Para el modo de conexión única se conecta solamente uno de los pines de entrada analógica y el voltaje medido se encuentra entre el pin seleccionado y el nodo tierra. El modo diferencial utiliza dos pines de entrada, donde uno representa la terminal positiva y el otro la terminal negativa que generalmente se conecta a tierra. Por tanto el ADS1115 tiene la capacidad para cuatro conexiones independientes y dos diferenciales.

IV. IMPLEMENTACIÓN DE SAD

Utilizando el ADS1115 se implementaron dos SAD con la finalidad de medir la temperatura para uno de ellos y otro para la variación de la intensidad del haz de un láser con respecto a un ángulo de polarización.

Como se mencionó anteriormente un SAD que entrega un dato digital ocupa: un sensor (que es el dispositivo que mide la variable física), un ADC y un microcontrolador (que permite procesar la señal recibida del ADC, en este caso será un microcontrolador ATMEL ATmega2560 [2]).

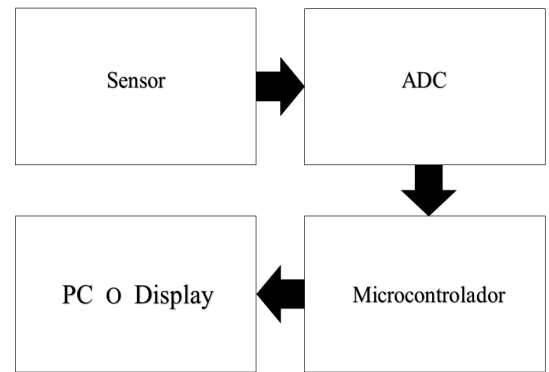


Figura 3: Diagrama de bloques mostrando el camino que sigue la señal

El SAD enviará una señal digital que se leerá como un voltaje, no como la variable física que se desea medir. Para obtener el valor de la variable física, esta se tiene que relacionar con dicho voltaje a través de un modelo matemático.

A. Sistema de medición de temperatura

El sensor utilizado para este sistema es un termistor. Un termistor es un dispositivo que varía su resistencia eléctrica por medio de la temperatura. El termistor utilizado es del tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) que disminuyen su resistencia al aumentar la temperatura ¹.

La conexión realizada para el sistema de medición de temperatura se muestra en la Figura 4.

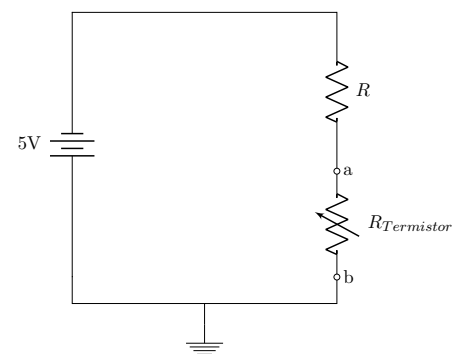


Figura 4: Circuito eléctrico para el sistema de medición de temperatura

Ecuación de Steinhart-Hart

Podemos establecer las siguientes dependencias entre las variables físicas:

$$T \rightarrow R \rightarrow V \quad (3)$$

El dato que brindará el ADC es el valor del voltaje entre las terminales de la resistencia $R_{Termistor}$. Haciendo

¹También existen los termistores tipo PTC (Positive Temperature Coefficient) que aumentan su resistencia al aumentar la temperatura.

referencia a la Figura y utilizando la ley de voltajes de Kirchoff es posible calcular el valor de la resistencia eléctrica mediante la siguiente ecuación:

$$R_{Termistor} = R \left(\frac{V_T}{V - V_T} \right) \quad (4)$$

Como se mencionó, el termistor cambia su resistencia en función de la temperatura, dicha relación es descrita mediante la siguiente ecuación:

$$T^{-1} = A + B \log(R) + C (\log(R))^3 \quad (5)$$

Relación conocida como la ecuación de Steinhart Hart. Dicha ecuación fue desarrollada empíricamente por John Steinhart y Stanley Hart en 1968, analizando distintas funciones de interpolación de termistores, determinando que la ecuación 5 es la que mejor se asemeja [6].

B. Sistema de medición de intensidad luminosa

De acuerdo al diagrama de bloque mostrado en la Figura 3, el sensor que se necesita para este SAD debe tener la característica de registrar variaciones de la intensidad luminosa. Existen diferentes tipos de sensores tales como: LDR o fotoresistor, fototransistor, fotodiodo, entre otros; estos se diferencian en el principio de funcionamiento. Se utilizan los fotodiodos Hamamatsu S2386[4] y LX1010CE distribuido por Longxinda Tech.

Un fotodiodo está formado como un diodo sencillo, dos bloques de Si dopado con: P, Ga, As; los cuales son llamados materiales tipo P y tipo N.

En el fotodiodo, al iluminar la unión de los materiales de tipo p y n, se obtiene un aumento en la corriente que se colecta en los contactos de la juntura, esto sucede cuando el fotodiodo se conecta en polarización inversa. Este aumento de corriente es explicado al considerar los efectos cuánticos debido a la estructura atómica del semiconductor que forma al fotodiodo.

Todo semiconductor tiene una determinada Banda que determina el valor mínimo de energía que necesita un fotón para deslizar un electrón de su banda de valencia y llevarlo a un estado vacío en la banda de conducción, donde este se mueve libremente produciendo corriente. El espacio que deja el electrón en la banda de valencia se conoce como hueco, el cual se puede considerar como un portador libre. Este es el proceso llamado creación de par electrón-hueco.

La respuesta del semiconductor ante la luz incidente es que el electrón absorbe la energía del fotón y salta a la banda de conducción. Cuando aumenta la intensidad de la luz incidente aumenta la corriente generada en el fotodiodo, solo si la frecuencia de la luz es mayor que la frecuencia gap [1] [7].

La señal recibida por parte del fotodiodo presenta varias desventajas entre ellas:

- El rango de voltajes utilizado es relativamente pequeño.
- El sistema presenta ruido desde el fotodiodo.
- La estabilidad de la señal dependerá de múltiples factores tales como: fuente de alimentación y fuentes externas de ruido.

Las desventajas presentadas por el fotodiodo no pueden ser completamente eliminadas, sin embargo se puede reducir su efecto utilizando distintos métodos. El circuito de amplificación de transimpedancia como el mostrado en la Figura 5, se utiliza para sistemas de amplificación de altas frecuencias (luz), y puede ser añadido al SAD, amplificando la señal y reduciendo parcialmente el ruido de la señal proveniente del fotodiodo. La estabilidad de la señal se consigue teniendo un área extensa de incidencia es decir un fotodiodo de área ancha, aproximadamente $10\text{mm} \times 10\text{mm}$. Otra consideración para tomar en cuenta es hacer uso de cables coaxiales el cual no permite la interacción de la señal con ondas electromagnéticas externas al circuito.

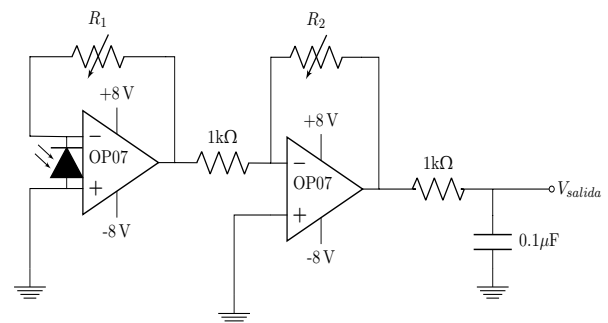


Figura 5: Circuito Amplificador de Transimpedancia utilizado en el Fotodetector

Para evitar que el fotodiodo se sature, es necesario poder manejar la intensidad luminosa de una manera más efectiva, para lo cual podemos utilizar diferentes dispositivos ópticos que puedan atenuar y enfocar sobre el fotodiodo un haz de forma precisa. Lo anterior se logra posicionando de forma adecuada un filtro y polarizadores que disminuyen la intensidad del haz; lentes, los cuales enfocan el haz sobre un punto; e iris, que reduce el área sobre la que el haz incide en el fotodiodo.

Ley de Malus

Para el SAD relacionado con la medición de la intensidad luminosa se pueden establecer las siguientes relaciones de dependencias:

$$I \rightarrow i \rightarrow V \quad (6)$$

Donde I es la intensidad luminosa, i es la corriente eléctrica que se genera en el fotodiodo y V es el voltaje entre las terminales del fotodiodo.

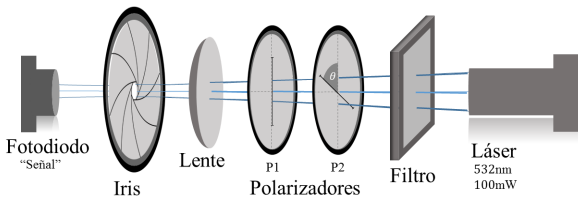


Figura 6: Montaje del sistema de medición de intensidad luminosa

Debido a las características del fotodiodo se puede establecer linealidad entre la intensidad I que incide en el fotodiodo con la corriente i que esta genera. Además en la región de polarización inversa del fotodiodo (región donde i es generada) la corriente presenta linealidad con el voltaje V . Lo anterior pone de manifiesto que $I \propto V$. Lo cual será de utilidad ya que es el voltaje de la señal que podrá ser analizada en el SAD.

Una vez establecida la proporcionalidad entre I con V y utilizando como referencia el montaje mostrado en la figura 6 (donde existe una configuración de dos polarizadores, P1 y P2), se puede predecir el comportamiento de V mediante la ley de Malus. La ley de Malus establece que la intensidad luminosa es proporcional a $\cos^2 \theta$, donde θ es el ángulo entre los ejes de transmisión de P1 y P2 [5]. La ley de Malus puede escribirse matemáticamente como:

$$I = I_0 \cos^2 (\theta - \varphi)$$

Donde φ es un ángulo de desfase que depende de las condiciones iniciales. Entonces debido a que $I \propto V$ se espera que el comportamiento de V sea el siguiente:

$$V = V_0 \cos^2 (\theta - \varphi) \quad (7)$$

V. RESULTADOS

A. Sistema de Medición de Temperatura

Como se mencionó anteriormente, el sistema de medición de temperatura funcionará adecuadamente luego de que este sea calibrado.

La calibración es necesaria ya que cada termistor posee características distintas, esto significa que si el termistor es reemplazado se deberá repetir la calibración. Luego de registrar el valor de resistencia eléctrica correspondiente a valores de temperatura dentro del rango de 0°C - 68°C se realizó un ajuste con los datos utilizando como función modelo la de Steinhart-Hart. Los parámetros encontrados con la calibración son:

$$\begin{aligned} A &= (0.000885168 \pm 4.708x10^{-5})K^{-1} \\ B &= (0.000274498 \pm 7.821x10^{-6})K^{-1} \\ C &= (-7.76967x10^{-8} \pm 3.153x10^{-8})K^{-1} \end{aligned}$$

En la Figura 7 se pueden apreciar los datos registrados y la curva de ajuste.

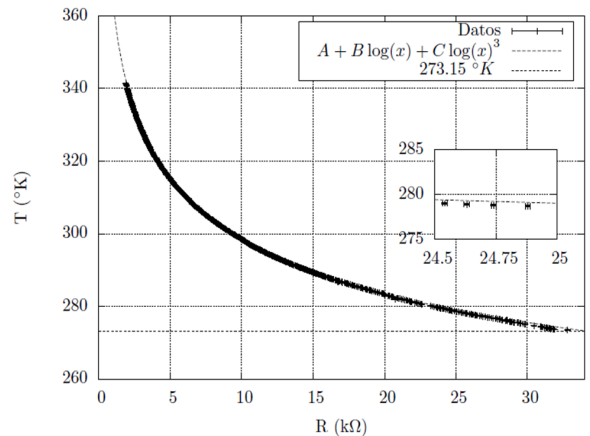


Figura 7: Curva de Calibración del Termistor utilizando el modelo de Steinhart-Hart

B. Sistema de Medición de Intensidad Luminosa

Variando el ángulo entre el eje de transmisión y el polarizador, y con esto variar la intensidad del haz del láser, se obtienen distintos valores de voltaje que dependen de dicho ángulo. Al momento de realizar una gráfica de Voltaje versus Ángulo de Polarización, se puede observar que esta coincide con el modelo presentado en la Ley de Malus.

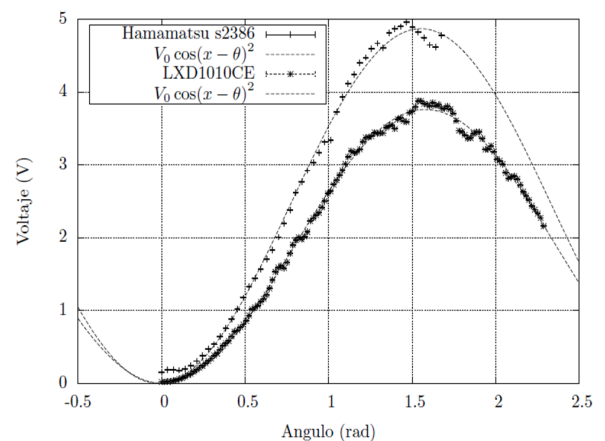


Figura 8: Curva de Ajuste, Ley de Malus, utilizando dos fotodiodos.

Es importante observar que a pesar del uso de un circuito para eliminar el ruido proveniente del ambiente en la señal, es imposible eliminarlo por completo. Sin embargo, es posible apreciar sin ningún problema la forma de la curva y su correspondencia con la Ley de Malus.

A diferencia del SAD anterior, en este no es necesario calcular variables mediante un ajuste para saber el valor de ellas ya que estos valores, V_0 y θ , dependerán del voltaje de entrada dentro del circuito y del punto de referencia en donde se empiecen a tomar los datos respectivamente.

VI. CONCLUSIONES

- El modelo presentado para la implementación de un SAD, brinda una alternativa sencilla y de bajo costo en comparación con instrumentos de medición profesionales para la medición de variables físicas. Lo anterior es constatado, analizando los resultados obtenidos de los SAD's implementados, donde las mediciones proporcionadas en cada SAD se acoplan a las ecuaciones que rigen su comportamiento.
- Para la construcción de un SAD es importante tomar en cuenta las necesidades técnicas deseadas, ya que el SAD puede ser mejorado utilizando un equipo que brinde mejores características; por ejemplo el ADC puede mejorar el SAD aumentando: el número de bits, la tasa de muestreo o ambas.
- En sistemas como el ADS1115 el rango de voltajes es una limitante, ya que solo permite señales hasta de 5V, la implementación de divisores de voltaje utilizando potenciómetros de precisión permite acoplar las señales en valores de voltaje superiores.

REFERENCIAS

- [1] Albanesi, E.; Roa, P. y Walz, M. (2013). Determinación de la constante de planck usando un fotodiodo de silicio. En *ANALES AFA*, Volumen 10.
- [2] Atmel Corporation (2014). *8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash*.
- [3] Blake, R. (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Thomson.
- [4] HAMAMATSU (2013). *Si photodiodes S2386 Series*.
- [5] Hecht, E. (2000). *Óptica*. ADDISON WESLEY IBEROAMERICANA, S.A., 3 enlugar. Sección 8.2.1.
- [6] John Steinhart, S. H. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep-Sea Research*, 15, 497–503.
- [7] Mark, J. (2003). *Photodetection and measurement*. McGraw Hill. Sección 1.
- [8] Sozanski, K. (2013). *Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits*. Springer. Sección 2.5.
- [9] Texas Instrument (2009). *Ultra Small, Low-Power, 16 Bit Analog to Digital Converter with Internal Reference ADS-1115*.