

Diseño y construcción de un sistema emisor/receptor compacto para experimentos de medición de la velocidad de la luz

J. Sierra Mendoza, R. Sánchez Grande, P. Miguel Yahir y E. Barrios Barocio

*Laboratorio de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma México,
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, 04510 Ciudad Universitaria, Ciudad de México.
e-mail: e.barrios@ciencias.unam.mx*

Received 15 August 2025; accepted 14 November 2025

Uno de los experimentos más populares en Óptica y Electromagnetismo es el de la medición de la velocidad de la luz, ya que reafirma la teoría electromagnética de Maxwell. Realizar este experimento en un salón de clases es bastante complejo debido a la dificultad para acceder a material adecuado y económico, así como por la falta de información en lo referente a la electrónica necesaria. En este trabajo describimos cómo implementar un sistema electrónico de láser pulsado y receptor rápido para realizar experimentos de medición de velocidad de la luz basados en el método de tiempo de vuelo, utilizando componentes de fácil acceso. El sistema es capaz de generar y detectar pulsos eléctricos y ópticos de 4.5 ± 0.1 ns a frecuencias de repetición de decenas KHz, con lo cual fue posible medir una velocidad de la luz en el aire de $v = (2.99 \pm 0.05) \times 10^8$ m/s con una desviación menor al 1 % respecto del valor oficial, y el cual fue posible montarlo dentro de una longitud de 5m. Este sistema también es capaz de medir la velocidad de la luz en materiales translucidos como el acrílico y agua. Para usuarios sin acceso a herramientas, y/o experiencia, para la construcción de circuitos electrónicos, presentamos una alternativa basada en la plataforma Arduino, la cual permite realizar mediciones comparativas de la velocidad de la luz en materiales, aunque con una precisión limitada.

Descriptores: Velocidad de la luz; láser pulsado; fotodiodo rápido.

One of the most popular experiments in Optics and Electromagnetism is the measurement of the speed of light, because it reaffirms Maxwell's electromagnetic theory. Conducting this experiment in a classroom is quite complex due to the difficulty in accessing suitable and affordable materials, as well as the lack of information regarding the necessary electronics. In this work we describe how to implement a pulsed laser and fast receiver electronic system to perform light speed measurement experiments based on the time-of-flight method, using available components. The system is capable of generating and detecting electrical and optical pulses of 4.5 ± 0.1 ns at repetition frequencies of tens of KHz, with which it was possible to measure a speed of light in air of $v = (2.99 \pm 0.05) \times 10^8$ m/s with a deviation of less than 1 % from the official value, and which was possible to implement within a length of 5 m. This system is also capable of measuring the speed of light in translucent materials such as acrylic and in water. For users without access to the tools for building electronic circuits, we present an alternative based on the Arduino platform, which allows for comparative measurements of the speed of light in materials, albeit with limited accuracy.

Keywords: Speed of light; pulsed laser; fast photodiode.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.23.020212>

1. Introducción

1.1. Motivación

En Óptica un tema de interés es la relación entre luz y ondas electromagnéticas dadas por las ecuaciones de Maxwell, y de las cuales se encuentra que la velocidad de la luz es $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s, por lo que poder medirla contribuye a entender dicha relación y a ganar habilidades prácticas. Sin embargo, llevar a cabo dicho experimento requiere de dispositivos electrónicos rápidos (láseres pulsados, fotodetectores y osciloscopios), tornando el experimento en algo difícil de implementar en un salón de clases. Esto ha contribuido a que distintas compañías vendan kits experimentales costosos [1–5] y con restricciones de hardware, lo cual lleva a que el experimento se aborde como algo demostrativo e imposibilitando el trabajo simultáneo de varios equipos de estudiantes.

Por otro lado, existen propuestas que han contribuido a que el experimento sea realizable en laboratorios de enseñanza, proporcionando flexibilidad y control al profesor o estudiante; sin embargo, requieren de material o equipo muchas veces inaccesible [6], o de circuitos electrónicos especiales [7], sin proporcionar detalles para que el usuario pueda buscar alternativas o hacer reparaciones [8–10]. También hay métodos indirectos para medir la velocidad de la luz [11, 12] accesibles y caseros, pero el hecho de no observar el tiempo y su retraso directamente generan cierto escepticismo, por lo que no son la mejor opción.

Este trabajo está motivado por la necesidad de proporcionar una solución para implementar un sistema experimental para medir la velocidad de la luz utilizando materiales accesibles y económicos, proporcionando detalles de la electrónica involucrada. Además de que se pueda implementar dentro de un salón de clases en un tiempo de no más de tres horas y con equipo típico de un laboratorio de enseñanza.

1.2. Contexto histórico

A lo largo de la historia, medir la velocidad de la luz ha motivado la realización de muchos experimentos. En el siglo XVII, Galileo Galilei propuso medir el retraso temporal de un pulso de luz al viajar cierta distancia [13]. Uno de sus ayudantes subió a una colina con una linterna, mientras que el subía a otra, también con una linterna. En un momento dado, Galileo descubriría su linterna, y cuando su ayudante observara la luz, descubriría su linterna. Tomando en cuenta el tiempo de reacción de su ayudante, sería posible encontrar el tiempo de viaje de ida y vuelta (t), y conociendo la distancia recorrida ($2d$), se podría calcular la velocidad mediante la ecuación:

$$v = \frac{2d}{t}, \quad (1)$$

donde d era la distancia entre las colinas. A este método se le conoce como medición del “*Tiempo de Vuelo de la Luz*” (TVL). El resultado de Galileo fue inconcluso y lo llevó a concluir que la velocidad de la luz no podía ser medida con la tecnología de dicha época.

En 1675, el astrónomo Ole Roemer ideó un experimento TVL en el que usó la distancia Tierra-Júpiter y los eclipses de Io (una luna de Júpiter) como “reloj”. Roemer se percató de que, dependiendo de la época del año, el periodo entre un eclipse y otro cambiaba debido a la diferencia de la distancia Tierra-Júpiter [13, 14]. Utilizando la distancia promedio Tierra-Júpiter y la diferencia de tiempo entre un eclipse en conjunción y uno en oposición, Roemer fue la primera persona en dar un valor aproximado de la velocidad de la luz: 2.2×10^8 m/s.

La invención de relojes más precisos, permitió mediciones TVL con mejores resultados. En 1849, el físico Hippolyte Fizeau, propuso un sistema TVL mecánico; consistía de una fuente de luz colimada y pulsada, que se reflejaba en un espejo a 8 km y regresaba. La fuente pulsaba gracias a una rueda dentada rotatoria de velocidad controlable (Fig. 1), y la luz se

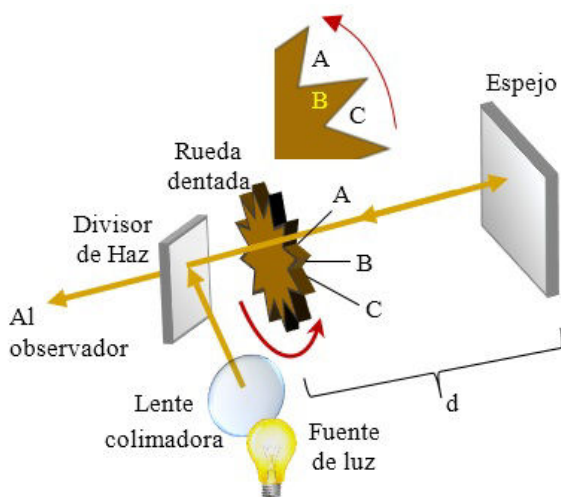


FIGURA 1. Diagrama del arreglo experimental de Fizeau.

redirigía hacia la rueda con ayuda de un divisor de haz que a su vez permitía al observador recibir el pulso de luz a su regreso desde el espejo.

Cuando un pulso sale hacia el espejo por la abertura A , y regresa (después de reflejarse) en el instante en que el diente B ha girado a una posición que cubre la trayectoria de regreso, entonces el pulso no alcanzará al observador detrás de la rueda. Sin embargo, a una rapidez de rotación mayor, la abertura C podría reemplazar a la A permitiendo que el pulso llegue al observador. Conociendo el número de dientes en la rueda y la rapidez angular de la misma, Fizeau pudo calcular el tiempo de viaje de un pulso y una velocidad de 3.15×10^8 m/s.

Una de las últimas mediciones TVL fue realizada por A. Michelson utilizando espejos giratorios, obteniendo un valor de $(2.99796 \pm 0.00004) \times 10^8$ m/s [13].

La importancia de estos experimentos ganó relevancia cuando, en la segunda mitad de los 1800's, James Clerk Maxwell concluyó que los campos eléctrico y magnético se propagaban en el espacio siguiendo la ecuación de onda [15]:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

donde la velocidad de la onda electromagnética era:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}. \quad (3)$$

Al comparar este valor con los resultados experimentales, Maxwell llegó a la conclusión de que la luz era una onda electromagnética.

2. Construcción de un sistema TVL

En la actualidad, gracias al desarrollo de la tecnología, es posible generar pulsos de mayor eficiencia que los generados por Fizeau. En particular, una fuente láser pulsada puede sustituir a la rueda dentada, mientras que un fotodiodo rápido al observador, permitiendo reducir la longitud del experimento.

Así, para implementar un experimento de TVL con una longitud del orden de metros, será necesario un láser pulsado en nanosegundos y frecuencia de repetición de KHz, para poder diferenciar un pulso de otro. De igual forma, el receptor tiene que tener capacidad para distinguir dichos pulsos.

En las siguientes secciones se presentará cómo implementar estos dispositivos.

2.1. Pulsador de avalancha

En el estudio de las capacidades de instrumentos de medición, son comunes los generadores de pulsos cortos basados en transistores de avalancha. Su uso se popularizó a raíz de una nota de aplicación de la compañía Linear Technology [16], la cual explica cómo construir un generador de pulsos de avalancha para probar puntas de osciloscopios. Estos generadores utilizan dos fenómenos:

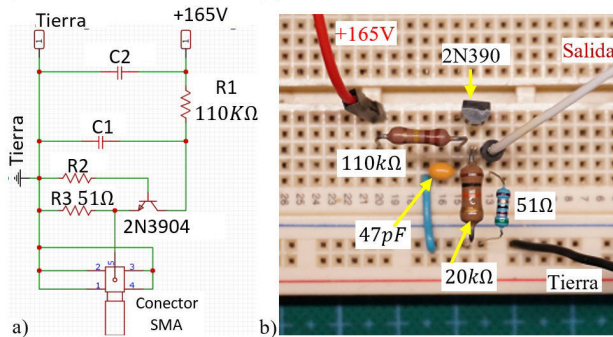


FIGURA 2. a) Diagrama de circuito de un pulsador de avalancha basado en el transistor 2N3904. b) Implementación del circuito en un Protoboard.

- *Rompimiento de Avalancha en un Transistor*, donde los electrones son acelerados por el campo eléctrico a energías suficientes para crear más pares electrón-hueco mediante colisiones con electrones ligados. Para esto, el voltaje colector-emisor V_{CE} se lleva a un voltaje tal que rompe la barrera de potencial entre la unión base-colector, produciendo una corriente abrupta e intensa en el colector al emisor I_c [17].
- *Oscilador de relajación*, es un circuito que produce una señal repetitiva. Consta de un dispositivo de conmutación que carga repetidamente un capacitor o inductor a través de una resistencia para luego descargarse.

El circuito del generador de pulsos consta de un transistor NPN, un capacitor C_1 y resistencias [R_1 , R_2 y R_3 , Fig. 2a)]. En nuestro caso, a diferencia del sugerido en la referencia [16], usamos el transistor 2N3904 ya que es común y accesible. Este transistor puede producir avalanchas (pulsos) cuando se somete a una diferencia de potencial de 165 VDC. Debido a esto, también es necesario construir una fuente con dichas capacidades (ver Apéndice A). Es posible utilizar otros transistores NPN, sin embargo, su voltaje de rompimiento puede ser distinto.

El capacitor C_1 se carga mediante la resistencia R_1 hasta el voltaje de rompimiento del transistor, momento en el cual entra en avalancha y se descarga rápidamente a través de la vía colector-emisor. La corriente de avalancha fluye a través de R_3 formando un pulso rápido entre la tierra y el emisor. Esto descarga abruptamente el capacitor haciendo que el voltaje entre colector y emisor caiga, interrumpiendo la avalancha.

R_1 y C_1 definen la constante de tiempo de repetición del oscilador, por lo que recomendamos valores de cientos de K Ω y de decenas de pF. Entre mayor sea la capacitancia, el tiempo de repetición será mayor; sin embargo, valores muy grandes pueden dañar el transistor por sobrecarga. R_3 acopla la impedancia de la señal de salida con el osciloscopio de medición; R_2 polariza la unión Colector-Base y entre mayor sea, impide el flujo de corriente por la base, generando pulsos con menor corriente; C_2 filtra la alimentación. La señal de salida

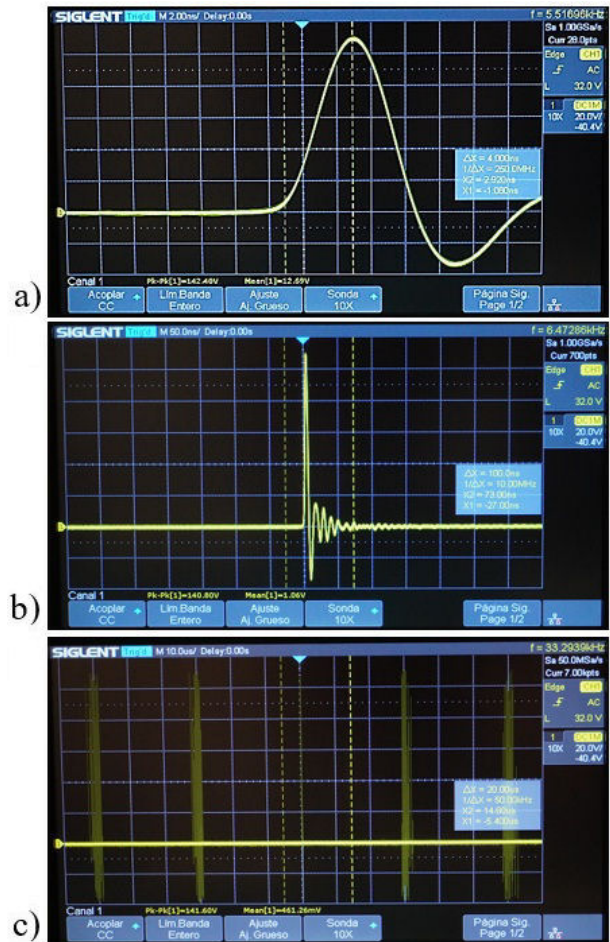


FIGURA 3. a) Pulso de salida. El ancho del pulso a media amplitud es de aproximadamente 4.5 ns. b) El pulso visto en una escala de 50 ns por división, donde se observan oscilaciones en su caída debido a las inductancias y capacitancias parásitas. c) Pulso visto desde una escala de 10 μ s, donde se puede apreciar la inestabilidad en la frecuencia de repetición (pulsos borrosos y no definidos).

se extrae mediante un conector SMA para la transmisión de señales con frecuencias altas.

Dadas las magnitudes de las señales involucradas, en la implementación del circuito, se recomiendan resistencias de 1 W y capacitores de 50 V. De igual forma, para evitar la deformación del pulso por inductancias, es recomendable mantener los componentes lo más próximos posible [Fig. 2b)], e implementar el circuito en un circuito impreso (aunque es posible implementarlo en un Protoboard). En nuestro caso, el mejor pulso se obtuvo con los valores mostrados en la Fig. 2.

La señal de salida se analizó con un osciloscopio Siglent SDS 1202X-E de 200 MHz. En la Fig. 3, se muestra el pulso generado con un ancho de (4.5 ± 0.1) ns a media amplitud (FWHM), lo que se traduce en un ancho espectral de hasta 220 MHz. Por esto se recomienda usar osciloscopios con anchos de banda de este orden para evitar errores en la medición del ancho del pulso.

Se puede observar que el pulso presenta oscilaciones en su caída, debido a un mal acoplamiento de impedancia entre

el circuito y el osciloscopio [Fig. 3b)]. Los valores utilizados generan una frecuencia de repetición promedio de 33 kHz; sin embargo, debido a que el transistor no está diseñado para operar en avalancha, hay fluctuaciones en esta frecuencia [Fig. 3c)]. La última característica del pulso es su voltaje pico de aproximadamente (107 ± 3) V, lo que sugiere que por la resistencia de 51Ω fluye una corriente de aproximadamente 2 A, pero debido a que el tiempo es muy corto, no hay peligro de daño al osciloscopio.

2.2. Láser pulsado

Usando el pulsador de avalancha, es posible alimentar un diodo láser para generar pulsos de luz cortos sin que el láser se dañe. Para esto se agrega un diodo láser en paralelo a la resistencia de acoplamiento de impedancia de 51Ω a la salida del pulsador (Fig. 4). En nuestro caso, usamos un diodo láser rojo (650 nm) comercial utilizado para apuntadores que no cuenta con regulador de corriente y solamente tiene una resistencia de seguridad para evitar corrientes altas.

Agregar esta carga eléctrica al circuito pulsador preserva el ancho del pulso en 4.5 ns; sin embargo, el cambio de impedancia incrementa las oscilaciones. Estas se pueden reducir variando el valor de $R3$, a expensas de disminuir la irradiancia de salida.

En el diseño PCB de este circuito, se preservó la salida SMA (Fig. 4) para usar la señal eléctrica como disparo para mediciones en el osciloscopio.

2.3. Receptor de pulsos ópticos

Dado que el pulso láser tiene un ancho de 4.5 ns, equivale a una señal cuya principal frecuencia es de 220 MHz. Para recibirla y medirla sin deformar el pulso, es necesario un fotodiodo que opere a ese ancho de banda o mayor. En nuestro caso, se usó un fotodiodo Hamamatsu S5972, con frecuencia de corte de 500MHz y sensibilidad de 0.44 A/W, el cual es relativamente accesible [18].

El circuito foto-receptor se construye conectando el fotodiodo en polarización inversa y en serie con una resistencia ($50 \text{ k}\Omega$), a un fuente de voltaje de 12 VDC filtrada [Fig. 5a)] proveniente de un regulador de 12 Volts UA78L12, el cual se alimenta con una fuente de 18 V.

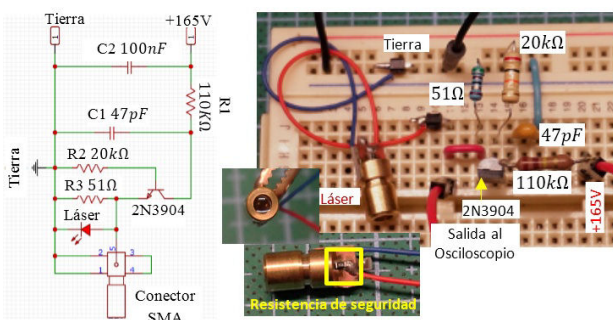


FIGURA 4. Diseño e implementación en proto-board de una fuente láser pulsada usando un diodo láser comercial.

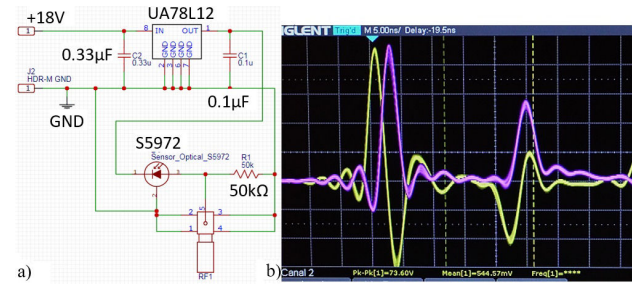


FIGURA 5. a) Diseño de un fotodiodo receptor rápido basado en el S5972. b) Señales observadas en el osciloscopio: amarilla, señal eléctrica directa del pulsador; morada, señal óptica recibida por el fotodiodo. Escala de tiempo: 5 ns por división.

La señal producida por el fotodiodo se extrae de la resistencia, la cual se puede modificar para aumentar o reducir la amplitud de la señal. La señal es recibida por un osciloscopio de dos canales de entrada, un canal para la señal eléctrica de disparo proporcionada por la fuente pulsada y otro para el canal del receptor.

En la Fig. 5b) se observa el pulso óptico (señal morada) recibido por el fotodiodo cuando se colocó a una distancia de 10 cm del láser. Se aprecia que el pulso principal sigue manteniendo un ancho de (4.5 ± 0.1) ns, lo cual es útil para experimentos TVL. El retraso de la señal óptica (morada) respecto de la eléctrica (amarilla), es debido tanto a la separación láser-fotodiodo como a un retraso en la emisión del pulso de luz producida por la capacitancia del diodo láser. Es de señalar que la señal óptica recibida tiene una amplitud menor que la de disparo, por lo que hay que ajustar las escalas de voltaje de cada canal adecuadamente.

Las señales se midieron con un osciloscopio de 200 MHz (Siglent SDS 1202X-E).

2.4. Medición de la velocidad de la luz

Con la fuente de luz pulsada y su receptor, es relativamente directo realizar el experimento de medición de la velocidad de la luz por TVL.

Con el propósito de estudiar simultáneamente posibles efectos de las capacidades de resolución de los osciloscopios, para estas pruebas, se utilizó un osciloscopio Agilent DSO6052A de 500 MHz; posteriormente, se usó un osciloscopio de menor capacidad, común en laboratorios de enseñanza.

La señal eléctrica del láser pulsado se conecta al canal 1 del osciloscopio, y se escoge como “disparo” (referencia) para realizar mediciones de tiempo. El láser se coloca como posición de origen del arreglo experimental y junto a él se coloca el receptor apuntando al láser, teniendo cuidado de medir la distancia que los separa [en nuestro caso (19 ± 0.2) cm, Fig. 6a)]. La salida del receptor se conecta al canal 2 del osciloscopio (“canal óptico”) donde se mostrará la señal recibida por el fotodiodo.

En esta disposición se realiza una medición para definir el tiempo “cero” en el canal óptico [Fig. 6b)], marcando su

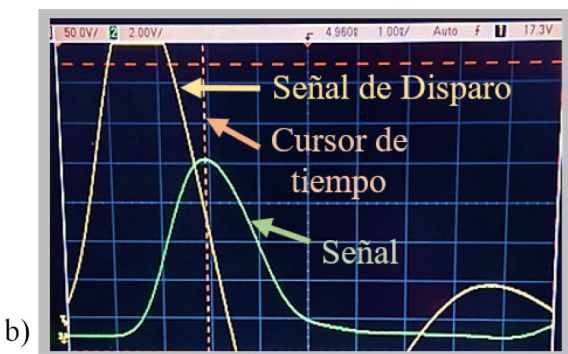
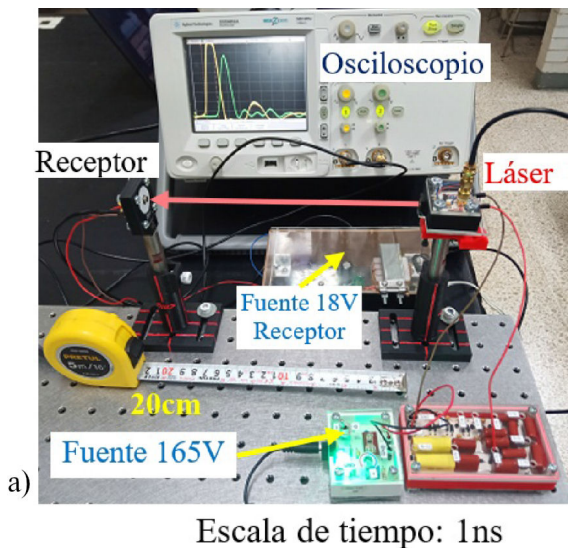


FIGURA 6. a) Diagrama del arreglo experimental para definir el cero del experimento. b) Señales observadas en el osciloscopio.

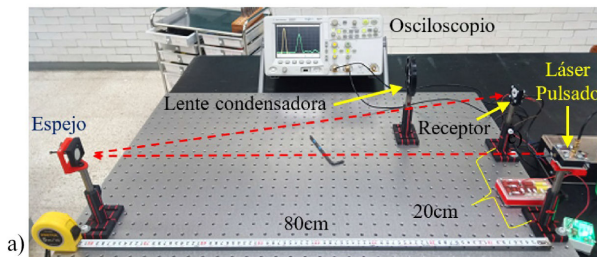


FIGURA 7. a) Diagrama del arreglo experimental con un recorrido más largo. b) Señales observadas en el osciloscopio.

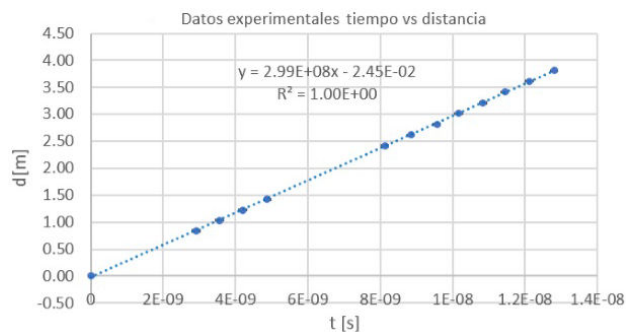


FIGURA 8. Datos experimentales de tiempo de retraso del pulso óptico a distintas distancias de recorrido.

máximo con ayuda de un cursor del osciloscopio; en nuestro caso (3.52 ± 0.04) ns.

Como segundo paso, se giran el láser y el detector de forma que apunten a un espejo colocado a $d = (80 \pm 0.2)$ cm [Fig. 7a)], el cual refleja el láser hacia el detector. Se mide la distancia total recorrida por la luz, y se marca la posición del pulso recibido en el osciloscopio [Fig. 7b)], que en nuestro caso fue de (8.36 ± 0.04) ns. En caso de que el área transversal del haz láser sea mayor que la del fotodiodo, se usa una lente delgada para enfocar el láser en el fotodiodo.

La diferencia de tiempo entre las dos marcas (4.84 ± 0.04) ns corresponde al tiempo de vuelo que tarda la luz en recorrer la distancia extra a los 19 cm originales, es decir, una distancia extra de (1.43 ± 0.02) m. Así, usando la Ec. (1), se obtiene una velocidad de la luz de $v = (2.95 \pm 0.05)$ m/s.

Un mejor resultado se puede obtener realizando varias mediciones a distintas distancias de recorrido y haciendo estadística (Fig. 8). En nuestro caso, dando un promedio de $\bar{v} = (2.99 \pm 0.05)$ m/s en el aire, el cual difiere en menos del 1% del valor oficial, algo adecuado para un laboratorio de enseñanza.

2.5. Osciloscopios de menor ancho de banda

Por lo general, en instituciones educativas es común encontrar osciloscopios de anchos de banda pequeños, como el Tektronix TBS1072C de 70 MHz, cuya escala mínima es de 2 ns e incertidumbre de 0.4 ns en su resolución. Aun con estos osciloscopios es posible realizar el experimento siguiendo el mismo procedimiento. Con dicho osciloscopio, la principal diferencia es que las señales presentan menos definición (Fig. 9), contribuyendo a errores en la medición del máximo. En esta situación, los tiempos registrados fueron: (4.5 ± 0.4) ns y (9.5 ± 0.4) ns, dando una diferencia de tiempo de (5.0 ± 0.4) ns y una velocidad de $v = (2.8 \pm 0.2) \times 10^8$ m/s, la cual sigue siendo congruente dentro de la incertidumbre con el valor oficial; sin embargo, la incertidumbre ha aumentado. Aun con esto, el resultado sigue siendo adecuado para laboratorios de enseñanza.

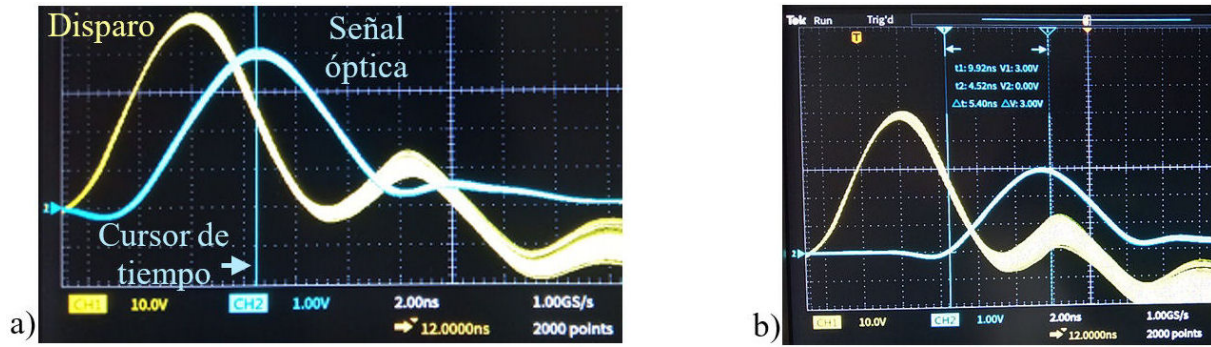


FIGURA 9. a) Posición de cero de referencial. b) Señales después del retraso.

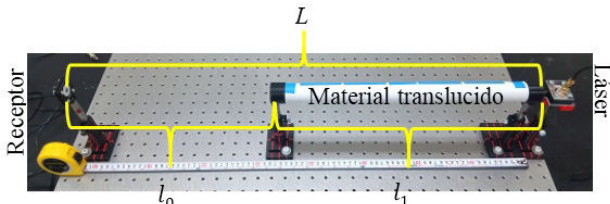


FIGURA 10. Arreglo experimental para medir la velocidad de la luz en algún medio translúcido.

2.6. Velocidades en materiales transparentes

El sistema también permite medir de la velocidad de la luz en materiales translúcidos utilizando un arreglo experimental como el mostrado en la Fig. 10, donde el receptor se coloca a una distancia L del láser y se toma el punto de referencia T_A en el osciloscopio, el cual corresponde al tiempo que tarda la luz en recorrer L en el aire. Posteriormente, se introduce el material (longitud $l_1 < L$), y se marca el tiempo del pulso recibido T_B , dando un retraso de: $\Delta T = T_B - T_A$.

Por otro lado, el tiempo de recorrido desde el emisor hasta el receptor en aire es: $T_{\text{aire}} = L/c$ (se tomó la velocidad en el aire como la velocidad en el vacío); mientras que, el tiempo solo en el material es $t_1 = l_1/v_1$ (donde la velocidad en el material es v_1). En consecuencia, el tiempo total de recorrido con la presencia de material en la distancia L es:

$$T = t_0 + t_1 = \frac{l_0}{c} + \frac{l_1}{v_1}, \quad (4)$$

donde l_0 es la porción recorrida por la luz en el aire. Desde este punto de vista, el retraso estará dado por: $\Delta T = T - T_{\text{aire}}$. Relacionando esto con el retraso experimental medido en el osciloscopio se puede encontrar que la velocidad en el material es:

$$v_1 = \frac{cl_1}{c(T_B - T_A) + l_1}. \quad (5)$$

En nuestro caso, para una barra de acrílico de $l_1 = (44.5 \pm 0.5)$ cm y una distancia $L = (1 \pm 0.01)$ m, se midieron tiempos $T_A = (6.48 \pm 0.02)$ ns y un tiempo $T_B = (7.20 \pm 0.02)$ ns. Encontrando una velocidad en el acrílico de $(2.018 \pm 0.002) \times 10^8$ m/s. Que corresponde a un índice

de refracción de: $n_{\text{acrl}} = 1.48 \pm 0.01$, el cual está en concordancia con el valor reportado para este material (1.488).

Para el caso de agua, se construyó un recipiente de un tubo PVC de $l_1 = (1 \pm 0.01)$ m con sus extremos tapados con láminas de vidrio, de forma que el láser pudiera cruzar el tubo con agua. En este caso, $L = (1.5 \pm 0.01)$ m, $T_A = (7.56 \pm 0.02)$ ns y $T_B = (8.76 \pm 0.02)$ ns. Lo cual dio una velocidad en el agua de $(2.22 \pm 0.01) \times 10^8$ m/s, que corresponde a un índice de refracción de: $n_{\text{agua}} = 1.34 \pm 0.08$, que concuerda con el valor reportado de 1.33.

3. Alternativa de mayor accesibilidad

En caso de que un osciloscopio este fuera de alcance, es posible realizar el experimento utilizando la plataforma Arduino y un sensor óptico VL53L0X [19], el cual es un módulo de medición de distancia láser que usa el método TVL para medir el retraso temporal de pulsos de luz que viajan una cierta distancia; consta de un diodo de avalancha de fotones individuales (SPAD) que detecta luz a 940 nm, y un láser de emisión superficial de cavidad vertical (VCSEL). El tamaño del módulo es de (2.4×4.4) mm, por lo que está montado en una placa PCB que se puede conectar a Arduino [Fig. 11a)]. El módulo cuenta con el microcontrolador y software necesarios para medir el tiempo de retraso del pulso y calcular la distancia que recorrieron. La comunicación con Arduino IDE es a través del protocolo I2C.

Una desventaja es que tanto el software como el hardware del módulo están patentados, por lo que no es posible conocer su programación interna y modificarla.

El módulo tiene seis pines [Fig. 11a)], de los cuales los fundamentales para su operación son: *alimentación* (VCC) de 5 V del Arduino, *tierra* (GND), *reloj* (SCL) para el control de la comunicación I2C, y *transmisión de datos* (SDA). Los dos pines de comunicación I2C se conectan a los correspondientes pines del Arduino.

Para poder manejar el módulo es necesario instalar la librería "VL53L0X", que cuenta con comandos específicos para realizar la medición [20]; en nuestro caso, el comando ("*readRangeSingleMillimeters()*"), el cual proporciona una medición de distancia en milímetros.

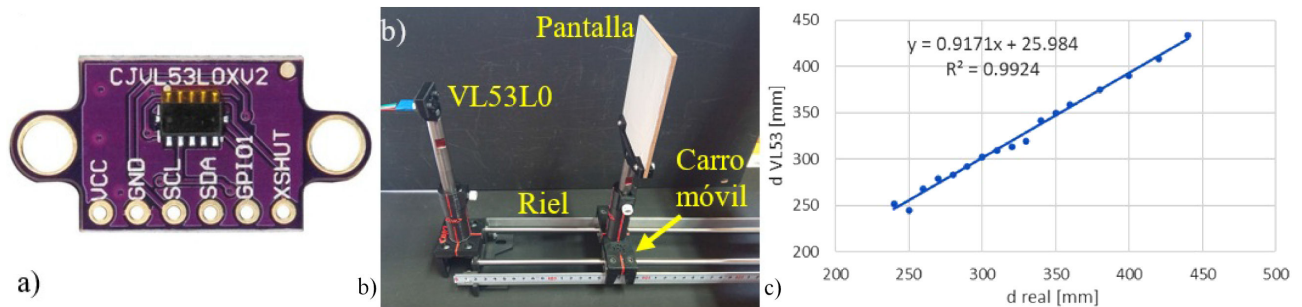


FIGURA 11. a) Diagrama de pines del módulo VL53L0X. b) Montaje para calibración del módulo. c) Gráfica de mediciones de distancia dada por el módulo (vertical) contra distancia real (horizontal).

El módulo requiere de una calibración previa a su uso ya que es común que proporcione mediciones desviadas debido a defectos de fábrica. Para esto, se usa un riel graduado donde el módulo se coloca en el origen del riel, y una pantalla en un carro móvil como obstáculo reflejante [Fig. 11b)]. Seguidamente se realizan mediciones de la “distancia real” (marcada por el riel) y de la “distancia medida” (dada por el módulo).

Si al graficar estas dos cantidades y hacer un ajuste lineal [Fig. 11c)] se observa que la pendiente no es 1 y la ordenada al origen no es cero, se aplica una transformación lineal a los datos para corregir estos errores; en nuestro caso $c_m = 1.062/\text{mm}$ y $c_b = -17.86$ mm, todo lo cual se hace dentro del programa de Arduino usando la función $y = c_m x + c_b$, donde x son los datos proporcionados por el módulo, mientras que y es el valor corregido.

3.1. Tiempo de vuelo con Arduino

La programación interna del módulo VL53L0X proporciona directamente la distancia a la cual se encuentra el objeto que refleja los pulsos (mitad de la distancia recorrida), por lo que si lo que requerimos es el tiempo de retraso, es necesario calcularlo a partir de la distancia proporcionada.

El módulo calcula la distancia utilizando el valor de $c = 0.299792$ mm/ps, por lo que el tiempo de vuelo puede ser calculado usando la *Distancia* proporcionada por el módulo (y corregida), multiplicándola por dos y dividiéndola por c . En consecuencia, el módulo solamente puede medir velocidades de la luz de materiales translúcidos ya que toma como referencia la velocidad en el vacío.

La incertidumbre estadística de la distancia del módulo es ± 1 cm, lo cual se traduce en una incertidumbre de tiempo de ± 20 ps, y de acuerdo a las indicaciones de la hoja de datos [19], no es recomendable hacer mediciones de distancias mayores a 3 m.

En nuestro caso, fue posible medir la velocidad de la luz en un bloque de acrílico rectangular con longitud de (21 ± 0.1) cm de forma similar al método TVL del sistema experimental de la sección anterior. El arreglo experimental se muestra en la Fig. 12; es importante que el módulo se coloque justo en la cara del acrílico sin dejar separación, ya que una pequeña separación permitiría que el módulo detecte el reflejo de la luz en esa primera superficie (luz que no entra al

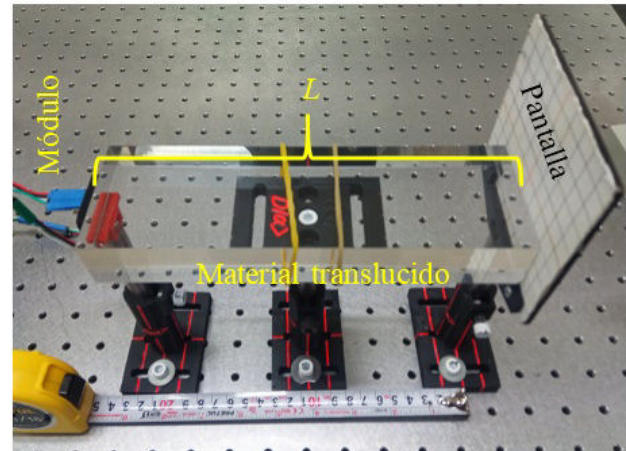


FIGURA 12. Arreglo experimental para medir la velocidad de la luz en algún medio translúcido con el módulo VL53L0X.

material) dando una medición errónea. Con este arreglo se encontró un tiempo de retraso debido al material de (2.31 ± 0.02) ns, lo cual lleva a una velocidad en el acrílico de $v = (1.81 \pm 0.09) \times 10^8$ m/s o un índice de refracción de $n = 1.66 \pm 0.08$.

Utilizando un recipiente de agua de 10.8cm de longitud, se encuentra un tiempo de (1.01 ± 0.02) ns, lo cual lleva a que la velocidad en el agua es $v = (2.13 \pm 0.2) \times 10^8$ m/s o un índice de refracción de $n = 1.40 \pm 0.1$.

Los resultados proporcionados por el módulo se desvían en hasta el 10 % respecto de los valores reportados, siendo de baja calidad; sin embargo, es suficiente para poder observar que la velocidad cambia en estos materiales, por lo que es una alternativa adecuada para situaciones en la que no se cuenta con recursos para material de mayor precisión.

4. Conclusiones

El sistema experimental para realizar la medición de la velocidad de la luz por tiempo de vuelo presentado en este trabajo, que consta de una fuente láser pulsada y un receptor rápido, es capaz de proporcionar mediciones, tanto en el aire como en medios transparentes, con una precisión de hasta el 1 %, lo cual consideramos apropiado para laboratorios de enseñanza. Los elementos utilizados permiten realizar dicho experimen-

to dentro de un salón de clases en una mesa con un área de (2×1) m, lo cual también permite realizar demostraciones en clases teóricas.

Los detalles de implementación y principios electrónicos detrás del sistema permiten que cualquier persona pueda realizar modificaciones y mejoras al sistema, lo cual contribuye a que instituciones educativas con recursos limitados puedan implementar y adecuar el experimento. El costo del sistema, sin incluir el osciloscopio de observación de las señales, se encuentra entre los 1000 MXN y 2000 MXN al 2025, dependiendo del proveedor y siendo el componente más costoso el fotodiodo rápido (cuyo costo ronda los 400 MXN). Este costo incluye el material necesario para construir los circuitos impresos.

Con el propósito de proveer alternativas, también se presentó un sistema equivalente basado en la plataforma Arduino y el sensor el VL53L0X, el cual es más accesible. Este sistema puede ser programado para medir la velocidad de la luz relativa en materiales; sin embargo, esta mayor accesibilidad se obtiene a costa de menor precisión, obteniendo resultados con errores de no menos del 10%. El costo de esta alternativa ronda los 500 MXN.

Este sistema permite complementar la enseñanza teórica con la experimentación, proporcionando una enseñanza más completa y permitiendo adquirir experiencia práctica en el manejo de instrumentos electrónicos.

5. Anexo: Fuente DC de 165V

Para generar voltajes DC de decenas de volts se puede usar un convertidor elevador de voltaje (CEV) combinado con un multiplicador Cockcroft-Walton (MCW).

Un CEV es un convertidor DC-DC que eleva el voltaje a cambio de reducir la corriente, conservando la potencia ($P = IV$). Es una fuente conmutada con un diodo, un transistor (que actúa como interruptor) y dos elementos para almacenar energía (un inductor y un capacitor) (Fig. 13).

Actualmente existen circuitos integrados diseñados para implementar un CEV's, como el LT1613 [21], el cual ayuda a generar voltajes de hasta 34 VDC a partir de 5 VDC. Este

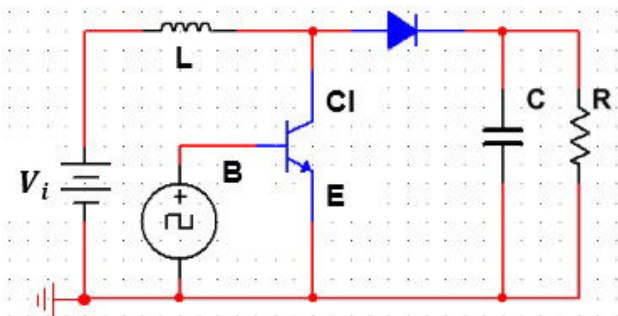
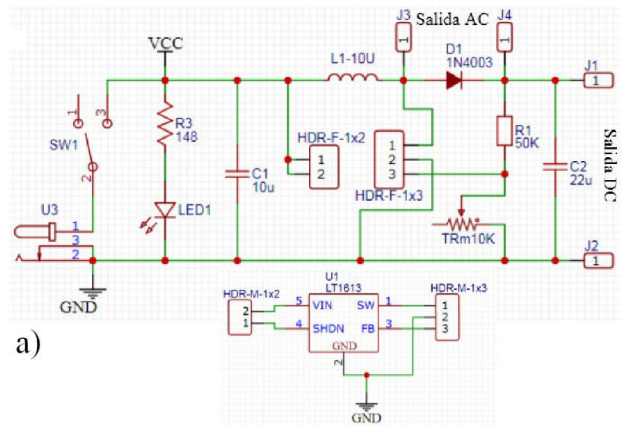
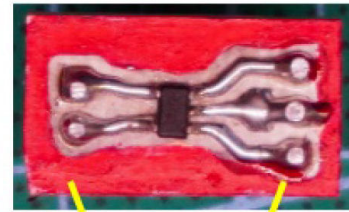


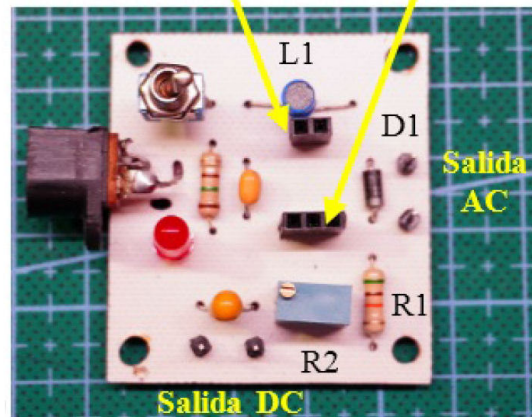
FIGURA 13. Diagrama de circuito de un CEV. L : inductor; C : capacitor; R : resistencia de carga; V_i : voltaje de alimentación; utilizando un transistor como interruptor. La señal en la base del transistor es de frecuencia alta. B : base; Ct : colector; E : emisor.



a)



b)



c)

FIGURA 14. a) Diagrama de circuito del CEV junto con b) el módulo del LT1613, el cual se conecta en la parte central del circuito. c) Implementación en PCB.

integrado regula el voltaje de salida (V_{out}) a través de un divisor de voltaje (resistencias $R1 = 50 \Omega$ y TRm de $10 \text{ K}\Omega$ en la Fig. 14).

En nuestro caso se implementó el CEV (Fig. 14) usando un inductor $L1 = 10 \mu\text{H}$, un diodo ($D1$ 1N4003 de 200 V y 1 A) y un capacitor de salida ($C2 = 22 \mu\text{H}$). El capacitor $C1$ filtra el voltaje de entrada. La ecuación que modela el voltaje de salida es:

$$V_{out} = 1.23\text{V} \left(1 + \frac{R1}{TRm} \right). \quad (6)$$

Si la señal de salida se toma de los polos del diodo, se tendrá una señal alterna de amplitud similar a la mantenida en el capacitor de salida.

Para ajustar la amplitud del voltaje de salida, simplemente se cambia el valor de la resistencia variable TRm . Es recomendable utilizar resistencias del orden de $\text{k}\Omega$ para limitar la corriente que fluye por el circuito y evitar que se sobrecaliente.

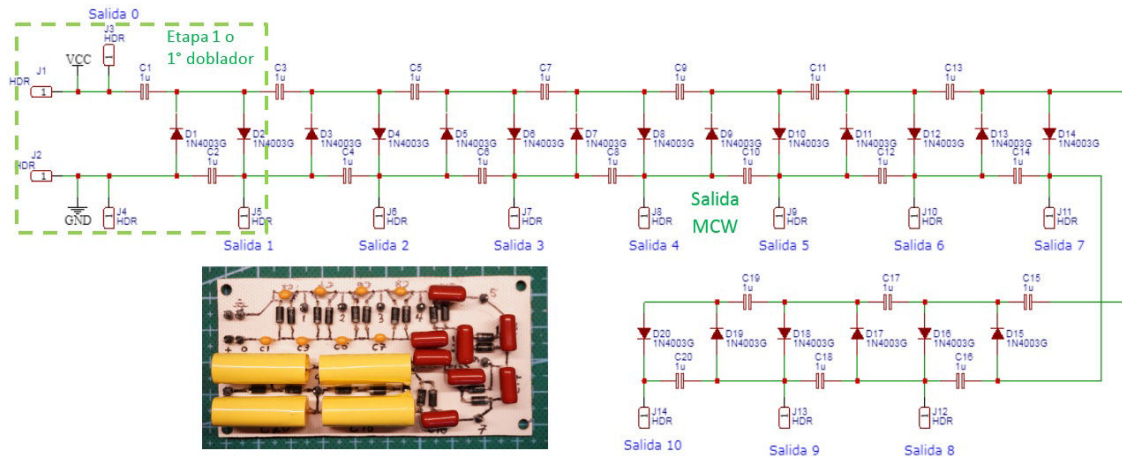


FIGURA 15. Diseñe e implementación de circuito del módulo MCW. Cuenta con diodos 1N4003 y capacitores de alto voltaje.

La señal AC del CEV será utilizada para alimentar un multiplicador Cockcroft-Walton (MCW), el cual convierte el voltaje AC en DC y lo amplifica [22, 23]. El MCW consta de varios dobladores de voltaje de media onda encadenados, cada doblador (Fig. 15) consta de dos capacitores ($C1$ y $C2$) y dos diodos ($D1$ y $D2$). El sistema basa su funcionamiento en la conservación de potencia ($P = VI$), aumentando el voltaje a expensas de reducir la corriente. Cada doblador constituye una etapa, donde el punto de salida está entre $D2$ y $C2$. La ecuación ideal que modela el comportamiento del voltaje de un MCW es:

$$V_o = 2N(V_P - V_D), \quad (7)$$

donde N es el número de etapas (número de dobladores de voltaje), V_P es el voltaje pico de la fuente AC y V_D es el voltaje de caída del diodo utilizado.

En nuestro caso, se construyó un MCW de 10 etapas, usando diodos 1N4003 ($V_D = 0.5$ V) y capacitores de $1 \mu\text{F}$, de los cuales los de las primeras 4 etapas soportan hasta 50 V, los de las siguientes 4 hasta 150V y los de las dos últimas hasta 250 V, para evitar que se puedan dañar por sobrecarga (Fig. 15).

Al alimentar el MCW con 18.6 VAC del CEV, es posible obtener voltajes de hasta 200 VDC en la décima etapa y de 167 VDC en la octava, el cual es suficiente para alimentar el pulsador de avalancha.

- Leybold, Leybold Optics Experiments Catalog: P5.6.3.1, 2025-05-5, <https://www.leybold-shop.com/vp5-6-3-1.html>
- Leybold, Leybold Optics Experiments Catalog: P5.6.1.1, 2025-02-5, <https://www.leybold-shop.com/vp5-6-1-1.html>
- Leybold, Leybold Optics Experiments Catalog: P5.6.2.1, 2025-05-5, <https://www.leybold-shop.com/vp5-6-2-1.html>
- PASCO, Lab Apparatus Catalog - Fundamental Constants 2025-05-5, <https://www.pasco.com/products/lab-apparatus/fundamental-constants/laser-speed-of-light-system>.
- PHYWE, PHYWE Catálogo de Física - Luz y Óptica - Propagación de la luz 2025-05-5, <https://www.phywe.com/es/fisica/la-luz-y-la-optica/la-propagacion-de-la-luz/apar-medidor-velocidad-d-la-luz.1890.2821/>
- R. A. DiCurcio, Speed of light with a rotating mirror and a laser, *Phys. Teach.* **16** (1978) 326-327, <https://doi.org/10.1119/1.2339963>
- A. Kilpelä *et al.*, Laser pulser for a time-of-flight laser radar, *Rev. Sci. Instrum.* **68** (1997) 2253-2258, <https://doi.org/10.1063/1.1148133>
- B. Brody, The Speed of Light: Making an Easy Time of It, *Phys. Teach.* **41** (2003) 276-277, <https://doi.org/10.1119/1.1571262>
- J. E. Carlson, Speed of light measurement with the laser pointer, *Phys. Teach.* **34** (1996) 176, <https://doi.org/10.1119/1.2344390>
- M. Ortiz *et al.*, How to measure the speed of light at your university with a dinner budget, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **37** (2015) 1502, <https://doi.org/10.1590/S1806-11173711649>
- University of Arizona - Wyant College of Optical Science, Measure the speed of light with a microwave, 2025-05-5, <https://wp.optics.arizona.edu/oscoutreach/measure-the-speed-of-light-with-a-microwave/>
- R. H. Stauffer Jr, Finding the speed of light with marshmallows-A take-home lab, *Phys. Teach.* **35** (1997) 231, <https://doi.org/10.1119/1.2344657>
- J. Hester *et al.*, 21st Century Astronomy, (W.W.Norton & Company, New York, NY, 2002), pp. 86-87

14. R. A. Serway *et al.*, Física para ciencias e ingeniería, 5a ed. (McGraw-Hill, México, DF, 2002), pp. 1107-1109
15. D. J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, 3rd ed. (Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999), pp. 375-376
16. J. Williams, Analog Devices - Technical Documentation Application Note AN72, 2025-05-5, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an72f.pdf>
17. W.D. Roehr *et al.*, High-speed switching transistor handbook, 1st ed., (Motorola, Phoenix, AZ, 1963), pp. 42, 63 - 67
18. Newark, Newark Product Catalog - Optoelectronics - s5972, 2025-05-5, https://mexico.newark.com/hamamatsu/s5972/diode-photo-800nm-to-18-3/dp/62M0263?srsId=AfmBOorMijhtwD5IbROHnISWttuYGGNwwWJWoO3_7Y8ZhBa7OMffa240
19. ST Microelectronics, Imaging and Photonics catalog, 2025-05-5, <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l0x.html>.
20. Pololu, Pololu Arduino library for VL53L0X, 2025-05-5, <https://github.com/pololu/vl53l0x-arduino>.
21. Analog Devices, Products catalog - Switching regulators and controllers, 2025-05-5, <https://www.analog.com/en/products/lt1613.html>.
22. Wikipedia, Cockcroft-Walton generator, 2025-05-5, https://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft%E2%80%93Walton_generator.
23. Andrew Levido, Circuit Cellar, 2025-05-5, <https://circuitcellar.com/resources/quickbits/cockcroft-walton-voltage-multiplier-2/>