

Del farol al láser: Una recreación moderna del intento de Galileo para medir la rapidez de la luz.



Ignacio Del Pino ¹, Maicol Flores ¹, Bruno Melissari ¹, Felipe Rinderknecht ¹

¹ Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

E-mail: felipe.rinderknecht@fcien.edu.uy

(Recibido el 10/11/2025, aceptado el 9/12/2025)

Resumen

En este trabajo presentamos una metodología experimental simple y robusta para medir la rapidez de la luz en pequeñas distancias (menores a un metro) con independencia de la fuente emisora. El sistema está compuesto por un láser programable, un divisor de haz y dos fotodiodos conectados a un osciloscopio, permitiendo determinar la rapidez de la luz a partir de la relación entre el delay temporal de las señales y la diferencia de caminos ópticos (desde el divisor hasta los fotodiodos). Se emitieron señales de tipo Seno y Sinc para frecuencias de 10, 20 y 30 MHz y se utilizaron los métodos de mínimos cuadrados y de correlación cruzada para calcular el delay. Se logró determinar la rapidez de la luz con un error relativo inferior al 0.2% para el Sinc y de 0.7% para el Seno. En suma, se logró diseñar una experiencia reproducible en laboratorios educativos que permite introducir conceptos como la propagación de ondas, frecuencia de muestreo, caminos ópticos y delay entre señales; además de continuar el enfoque de los trabajos clásicos de Galileo sobre la naturaleza de la luz.

Palabras clave: Rapidez de la luz, Divisor de haz, Enseñanza de la Física, Física experimental, Óptica.

Abstract

In this work we present a simple and robust experimental methodology to measure the speed of light at short distances (less than one meter) independently of the emitting source. The system is composed of a programmable laser, a beam splitter, and two photodiodes connected to an oscilloscope, allowing the determination of the speed of light from the relationship between the temporal delay of the signals and the difference in optical paths (from the splitter to the photodiodes). Sinusoidal (Sine) and Sinc-type signals were emitted for frequencies of 10, 20, and 30 MHz, and the least-squares and cross-correlation methods were used to compute the delay. The speed of light was determined with a relative error of less than 0.2% for the Sinc and 0.7% for the Sine. In summary, a reproducible experiment for educational laboratories was designed that introduces concepts such as wave propagation, sampling frequency, optical paths, and delay between signals; in addition to continuing the approach of Galileo's classical works on the nature of light.

Keywords: Speed of light, Beam splitter, Teaching of Physics, Experimental Physics, Optic

1. Introducción

Durante una tormenta eléctrica es fácil notar cómo, tras el impacto de un rayo, el relámpago se observa antes de que se escuche el trueno. La diferencia temporal entre ambos fenómenos sugiere, de manera inmediata, que la luz y el sonido se propagan con distinta rapidez. Con esta idea en mente, en el siglo XVII el filósofo y científico Pierre Gassendi se propuso determinar experimentalmente la rapidez del sonido en el aire (Larraín, 2013).

Su experimento consistió en detonar un cañón cargado únicamente con pólvora, durante una noche sin viento, mientras un ayudante observaba a unos 1400 metros de distancia. El destello de la pólvora marcaba el inicio de la medición y el sonido del estruendo, su final. El tiempo transcurrido se medía con un pulsilogium, un rudimentario dispositivo basado en la oscilación de un péndulo que fue precursor del cronómetro. Con esta sencilla pero ingeniosa disposición, Gassendi logró estimar con notable precisión, para la época, la velocidad de propagación del sonido en el aire (Larraín, 2013).

Años más tarde, Galileo Galilei retomaría el mismo razonamiento para cuestionar una idea ampliamente aceptada: que la luz se propagaba de forma instantánea. En su obra "Diálogo: Dos nuevas ciencias" (Galilei, 1954), Galileo puso en boca de tres personajes ficticios que caracterizan formas distintas de pensar: Simplicio (con pensamientos aristotélico y geocéntrico), Sagredo (un observador neutral) y Salviati (que defiende las ideas de Galileo) una discusión sobre la naturaleza de la propagación luminosa. Allí, Salviati, propone un método experimental para comprobar si la luz requiere tiempo para desplazarse.

Allí Galileo dejó por escrito la siguiente conversación:

-Simplicio: La experiencia de cada día nos enseña que la propagación de la luz es instantánea; porque, cuando vemos disparar de muy lejos una pieza de artillería, el chispazo nos llega a los ojos, sin que transcurra tiempo; y, en cambio, el sonido no llega a nuestros oídos sino tras un intervalo perceptible.

-Sagredo: Bueno, Simplicio, lo único que puedo inferir de esa experiencia tan conocida es que el sonido, para llegar a nuestros oídos, tarda más que la luz; pero no me dice si la venida de la luz es instantánea o si, aunque rapidísima, ocupa tiempo. Esta suerte de observaciones no nos enseña más que aquello de que "en llegado el sol al horizonte, nos llega su luz a los ojos"; pues, ¿quién me asegura que los tales rayos no han llegado al sobredicho límite antes de llegar a nuestra vista?

-Salviati: Lo escaso de la fuerza probatoria así de estas observaciones como de otras por el estilo me indujo

en cierta ocasión a elucubrar un método mediante el cual pueda uno averiguar con certidumbre si es en verdad instantánea la iluminación, o sea, la propagación de la luz. El que la velocidad del sonido sea tan grande como lo es, nos da la certeza de que el movimiento de la luz no puede menos de ser velocísimo. He aquí el experimento que se me ocurrió.

(Galilei, 1954, p. 29-30).

Tras desarrollar este pensamiento, Galileo intentó determinar el valor de la rapidez de la luz, para lo cual ideó el siguiente experimento: dos personas se sitúan en montañas separadas por una distancia conocida, cada una con una farola de vela. Una de ellas destapa su farola; cuando la otra percibe la luz, debe destapar la suya, generando así dos destellos sucesivos. Midiendo el intervalo entre ambos destellos y conociendo la distancia entre los observadores, Galileo esperaba estimar la rapidez de la luz. En la Figura 1 se ilustra este experimento.

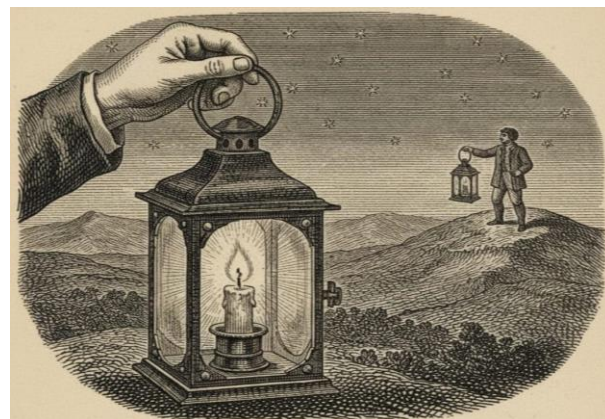


FIGURA 1. Ilustración del experimento de Galileo para determinar la velocidad de propagación de la luz. Imagen creada con Gemini IA.

Sin embargo, el resultado fue infructuoso: los observadores percibían las farolas encenderse casi de inmediato. Galileo concluyó entonces que si la luz no era instantánea, su rapidez debía ser tan grande que escapaba a sus medios de observación. Aún así, este enfoque ofrecía un acercamiento empírico para mostrar que la luz tenía una rapidez finita y sentó las bases para métodos posteriores.

Actualmente, podemos preguntarnos cuáles eran las limitaciones del experimento de Galileo y cómo podrían resolverse con los instrumentos de hoy.

Por una parte, podemos afirmar que la idea de Galileo de mantener una distancia fija y determinar el tiempo que le toma a la luz recorrer esa distancia de ida y vuelta simplifica el problema debido a que convierte el

desafío en uno donde sólo hay una magnitud por medir: el tiempo de vuelo desde la emisión hasta el arribo.

Por otra parte, una de las principales limitaciones del método radica en el tiempo de reacción humano: el observador demora unas centésimas de segundo para percibir la luz y destapar su farola, un intervalo enorme si lo que queremos es medir una rapidez que en la cotidianeidad se percibe como infinita. Además, este retraso aparecía dos veces, ya que el tiempo se medía desde que el primero emitía con su farola hasta que él mismo era capaz de percibir la segunda emisión; sin contar que los instrumentos para registrar el tiempo no garantizaban precisión ni exactitud.

Si estuviéramos en tiempos de Galileo, una posible mejora podría ser que sólo se tenga un emisor que provoque el destello (o pulso) y que esta luz llegue a un espejo a una distancia fija, de modo que el propio emisor cumpla también el rol de observador al percibir la reflexión del pulso en el espejo; lo cual asegura que la luz viaje de ida y vuelta por un camino y evitando el tiempo de retardo asociado al segundo observador. No obstante, se seguiría teniendo un retraso debido a las capacidades del emisor para registrar el tiempo de arribo de la luz reflejada.

Los instrumentos actuales de medición y emisión, permiten una sincronización casi perfecta, con tiempos de retardo menores al nanosegundo (10^{-9} s) debido a que poseen una frecuencia de muestreo muy alta. Esto significa que nuestros aparatos de medición registran miles de millones de datos en un único segundo. Por ejemplo, el emisor con la farola podría ser sustituido por un láser programable, el cual se activa con un generador de señales, de forma que el pulso sea controlado, mientras que el receptor podría ser un fotodiodo el cual convierte la luz que recibe en una señal eléctrica que podemos registrar como un voltaje medible con un osciloscopio. Además, el voltaje suministrado al láser programable podría ser registrado con el mismo osciloscopio que controla el fotodiodo, de modo que la emisión y recepción tengan sus tiempos medidos con el mismo reloj. Este tipo de montaje es lo que se propone en Greaves et al. (2009).

Estos montajes actuales no serían posibles sin las propuestas previamente presentadas. Por ejemplo, los primeros refinamientos vinieron de parte de Michelson (1879) quien utilizaba la interferencia de la luz para determinar su rapidez. Posteriormente, Parker y Gold (1958), propusieron un montaje didáctico basado en pulsos de luz idénticos: generaban pares de pulsos y analizan su transformada de Fourier. Allí relacionaban los ceros del espectro de frecuencias con el intervalo temporal entre los pulsos; la desventaja es que requiere un recorrido de decenas de metros. En los años siguientes

surgieron otros esquemas de laboratorio usando moduladores electrónicos y métodos de delay (Tyler 1969; Vanderkooy y Beccario 1973) para demostrar experimentalmente que la luz tarda un tiempo finito en recorrer una distancia dada. Más recientemente se han desarrollado variantes empleando punteros láser y técnicas de sincronización modernas (Carlson 1996, Gülmez 1997 y Mak y Yip 2000) con un osciloscopio. Aoki y Mitsui (2008) propusieron un montaje del tamaño de unos pocos metros el cual emplea un láser pulsado y un fotodetector conectados a un osciloscopio de alta velocidad, midiendo directamente el tiempo de vuelo de ida y vuelta del pulso luminoso. Uno de los trabajos que resalta por su originalidad es el de Toledo y López (2011) donde se utiliza un horno microondas sin plato giratorio, relacionando la distancia entre 2 puntos calientes con la longitud de onda y, conociendo la frecuencia utilizada por el horno, determinan la rapidez de la luz.

Recientemente, Rodríguez et al. (2017) recopilaron estas y otras propuestas didácticas en un contexto educativo, resaltando la importancia de cada montaje previo para lograr montajes modernos como el descrito en este trabajo.

A pesar de lo mucho que simplifican los montajes, los láseres programables suelen tener un voltaje umbral, el cual debemos superar para lograr encenderlos y que emitan luz efectivamente. Este fenómeno también puede generar la aparición de retardos entre el voltaje suministrado por el generador de señales y la emisión real del láser. Para evadir este tipo de problemas, se pueden proponer estrategias de medición que sean independientes de la emisión de la fuente.

El montaje experimental que se presenta en este trabajo sigue precisamente este principio. Un láser programable emite un pulso de luz controlado por un generador de señales, que incide sobre un divisor de haz (o espejo dicróico). Este divide el rayo en dos haces que llegan a dos fotodiodos conectados al mismo osciloscopio. La diferencia temporal entre las señales de ambos fotodiodos (el delay) permite calcular el tiempo de propagación de la luz entre sus posiciones. Repitiendo la medición mientras se varía la posición de uno de los fotodiodos, se obtiene una serie de datos cuya pendiente representa la rapidez de la luz.

Este enfoque elimina los efectos del retardo de la fuente emisora y de los instrumentos intermedios, y demuestra que, con recursos accesibles en un laboratorio de Física, es posible medir la rapidez de la luz con una gran precisión y requiriendo de distancias muy cortas, menores a un metro.

En suma, la experiencia presentada en este trabajo conserva el espíritu del experimento de Galileo,

pero lo lleva a un terreno donde la tecnología moderna hace posible lo que en el siglo XVII era apenas una intuición.

2. Materiales y métodos

2.1 Montaje experimental

El montaje experimental se ilustra en la Figura 2, donde se aprecia un módulo láser programable modelo KY008 que emite un haz lumínico regulado por un generador de señales, luego este haz es dividido por un espejo dicróico y llega a dos fotodiodos amplificados de silicio modelo PDA10A2, los cuales convierten la iluminación percibida en una diferencia de potencial que es registrada en un osciloscopio.

Con el objetivo de tener un movimiento suave del fotodiodo móvil, este fue colocado sobre un riel con un carro móvil lo cual permitía desplazarlo fácilmente y no perder la alineación con respecto al haz de luz. Para ello, previamente se alineó el eje central del riel con la dirección del haz de luz.

Para decidir las dimensiones del experimento, es decir, el tamaño del riel y el desplazamiento del fotodiodo móvil entre cada medición, se debe tener en cuenta la frecuencia de muestreo del osciloscopio; que en este experimento fue de $f_s = 50 \text{ MHz}$. Considerando un tiempo mínimo de detección de cambios de $T = \frac{1}{f_s}$ la distancia recorrida en ese intervalo es $\Delta x = cT$. En este caso, $\Delta x = 0.06 \text{ m}$, por lo que se decidió que el fotodiodo móvil fuera desplazado de a 1.0 cm, hasta completar 1.00 m. De esta forma, cada medición generó 100 series de datos de voltaje, para cada fotodiodo, en función de la distancia, reduciendo significativamente los efectos de errores aleatorios en las mediciones.

Se moduló la luz del láser por medio de un generador de señales que emitió de dos formas específicas: senoidales (Seno) y senos cardinales (Sinc). Para ambas se utilizaron frecuencias centrales de 10 MHz, 20 MHz y 30 MHz. Esta elección no fue arbitraria: previamente se ensayaron distintas señales a diversas frecuencias, como por ejemplo la función escalón, triangular, pulsos gaussianos y dientes de sierra. Sin embargo, este tipo de señales resultan difíciles de generar a las frecuencias requeridas para el experimento (del orden de los MHz), debido al funcionamiento del generador utilizado. Por este motivo se optó finalmente por emplear las funciones Seno y Sinc, que fueron las que mostraron un mejor desempeño a las frecuencias mencionadas.

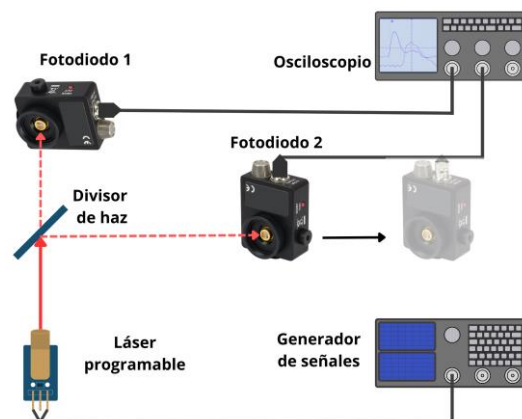


FIGURA 2. Ilustración del montaje experimental para la determinación de la rapidez de la luz.

Además del tipo de señal emitida, se realizó un estudio de amplitud para garantizar que el fotodiodo detectara correctamente el haz emitido. A partir de este estudio se determinó el voltaje umbral del fotodiodo, es decir, el voltaje de alimentación del láser para que el fotodiodo comience a detectar la señal. De esta manera se aseguró que, en todas las mediciones, la señal superase dicho valor umbral con la adición de un valor constante (llamado offset). Por lo tanto, las oscilaciones se realizaban por encima de este umbral.

2.2 Métodos de análisis de datos

La finalidad de este análisis es determinar el delay temporal entre las señales de dos fotodiodos a partir de las señales adquiridas con el osciloscopio (posteriormente normalizadas), para cada posición del fotodiodo móvil. Esto se debe a que la curva de delay temporal en función del desplazamiento del fotodiodo móvil respecto de la posición inicial se corresponde con una recta cuya pendiente es el inverso de la rapidez de la luz. Una vez obtenida dicha curva, los datos se ajustan por una recta por medio del método de mínimos cuadrados, determinando así la rapidez de la luz como el inverso de la pendiente del ajuste.

Para determinar el delay entre las señales de los fotodiodos se utilizaron dos métodos: método de mínimos cuadrados (MMC) y correlación cruzada (CC). Se intentó utilizar métodos que se basen en seguir los máximos de las señales y a partir de ellos determinar el delay, pero no se obtuvieron buenos resultados en comparación a los otros métodos utilizados, debido a que seguir máximos utiliza únicamente ese punto, y tanto MMC como CC utilizan toda la señal.

El método de mínimos cuadrados para determinar el delay entre dos señales parte de la hipótesis de que ambas señales comparten el mismo

comportamiento pero que están desplazadas temporalmente; y consiste en determinar cuál es el delay que minimiza la suma cuadrática de las diferencias (resta aritmética) entre ambas señales. En la práctica, se desplaza temporalmente una señal respecto a la otra y se calcula la suma de los errores cuadráticos entre sí, obteniendo el delay como aquel desplazamiento temporal que minimiza la suma de los errores cuadráticos. En la Figura 3 se muestra una ilustración de cómo se puede obtener el delay entre dos pulsos (S_1 y S_2) por medio del método de mínimos cuadrados.

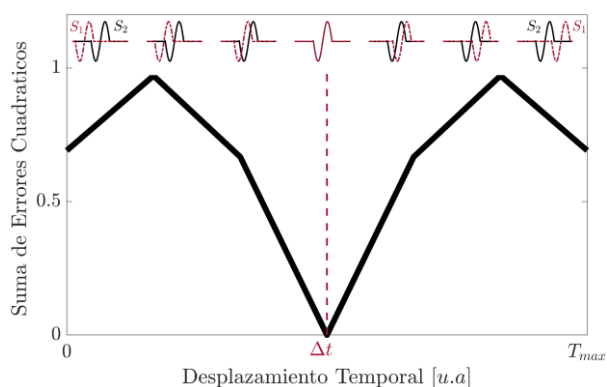


FIGURA 3. Ilustración de la obtención del delay entre dos pulsos a partir del método de mínimos cuadrados (MMC). Se observa cómo el error cuadrático mínimo se obtiene cuando ambas señales están en fase, es decir, cuando una se desplaza un Δt .

El método de correlación cruzada asume las mismas hipótesis que el MMC, sin embargo, en lugar de calcular un error cuadrático, este método se fundamenta en el hecho de que si dos señales están en fase el gráfico de una respecto a la otra será la recta identidad (recta de pendiente 1) y, por el contrario, si ambas están completamente desfasadas, este gráfico toma la forma

de la recta anti-identidad (recta de pendiente -1). De esta forma, el método intenta determinar el delay entre las señales al calcular cuál es el desplazamiento temporal entre las señales que maximiza la pendiente del gráfico entre ellas. En la Figura 4 se muestra una ilustración de cómo se puede obtener el delay entre dos pulsos (S_1 y S_2) por medio del método de correlación cruzada al graficar la pendiente del gráfico S_1 vs S_2 en función del tiempo.

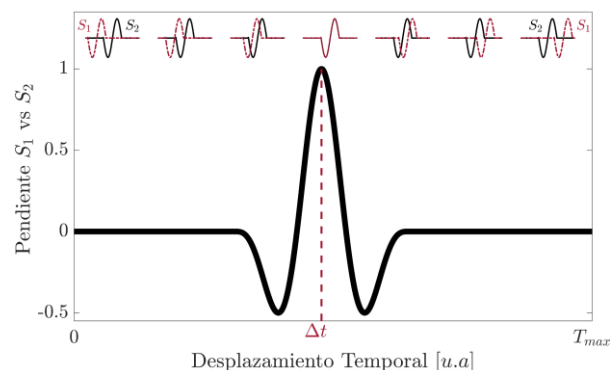


FIGURA 4. Ilustración de la obtención del delay entre dos pulsos a partir del método de correlación cruzada. Se observa cómo el máximo de correlación se obtiene cuando ambas señales están en fase, es decir, cuando una se desplaza un Δt .

3. Resultados y discusiones

En la Figura 5 se muestran los resultados de delay en función de la distancia del fotodiodo móvil respecto a la posición inicial para una modulación del láser de una señal sinusoidal para frecuencias de 10 MHz, 20 MHz y 30 MHz. Mientras que en la Figura 6 se muestran para una modulación de una señal de tipo Sinc (seno cardinal) de frecuencia central de 10 MHz, 20 MHz y 30 MHz.

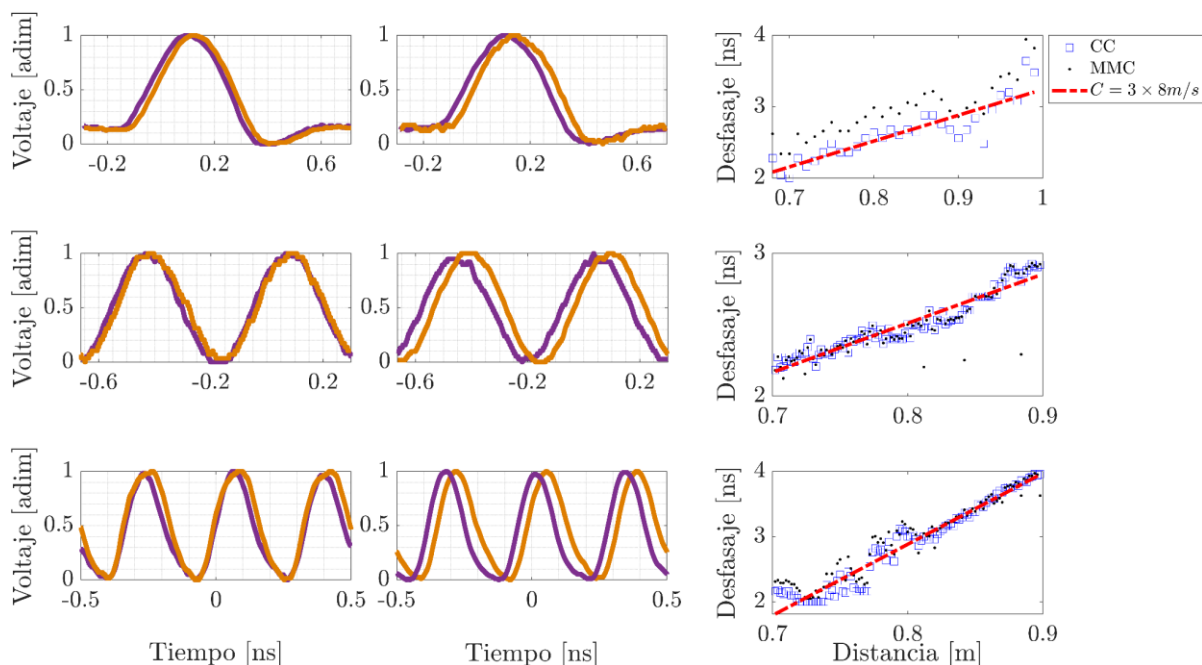


FIGURA 5. Cada fila muestra los datos para emisiones sinusoidales de frecuencia 10, 20 y 30 MHz respectivamente. En la primera columna se muestran las señales de ambos fotodiodos (violeta y naranja) para la primera toma de datos, mientras que en la segunda columna se muestra para la última toma de datos (luego de haber desplazado un metro el fotodiodo móvil). Entre las primeras dos columnas se puede observar un incremento en el delay de las señales, producto del aumento entre caminos ópticos al mover uno de ellos. En la tercera columna se muestra el delay entre ambas señales en función de la distancia del fotodiodo móvil respecto a su posición en la primera toma de datos.

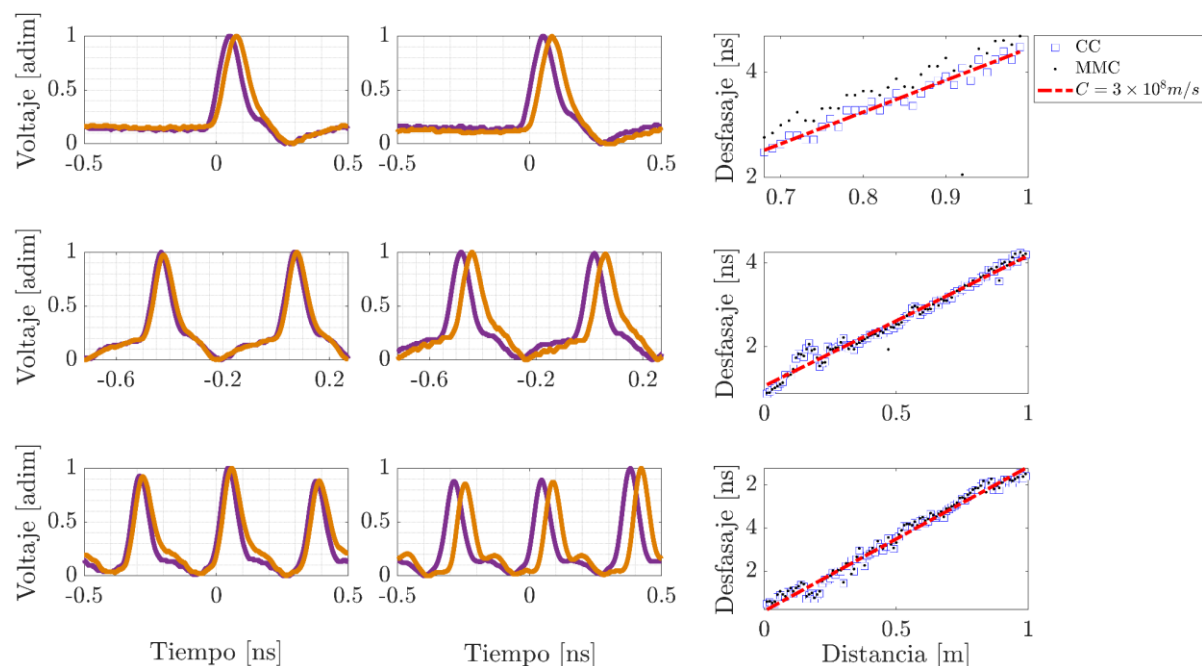


FIGURA 6. Cada fila muestra los datos para emisiones de senos cardinales de frecuencia central 10, 20 y 30 MHz respectivamente. En la primera columna se muestran las señales de ambos fotodiodos (violeta y naranja) para la primera toma de datos, mientras que en la segunda columna se muestra para la última toma de datos (luego de haber desplazado un metro el fotodiodo móvil). Entre las primeras dos columnas se puede observar un incremento en el delay de las señales, producto del aumento entre caminos ópticos al mover uno de ellos. En la tercera columna se muestra el delay entre ambas señales en función de la distancia del fotodiodo móvil respecto a su posición en la primera toma de datos.

Los datos de delay función de la distancia del fotodiodo móvil que fueron presentados en las Figuras 5 y 6, fueron ajustados linealmente, obteniendo la rapidez de la luz experimental como el inverso de la pendiente del ajuste lineal. Posteriormente, se determinó el error relativo respecto al valor de referencia de BIPM (2018). Para ello se hizo uso, nuevamente, del método de mínimos cuadrados. En la Tabla 1 se resumen estos resultados mostrando el error relativo de cada una de las configuraciones y cada uno de los métodos de obtención del delay.

TABLA 1. Se muestran los resultados de error relativo obtenidos para los métodos de correlación cruzada (CC) y mínimos cuadrados (MMC) para cada señal y frecuencia.

Señal	Método	Error relativo (%)		
		10 MHz	20 MHz	30 MHz
Seno	CC	6.67	3.14	23.5
	MMC	2.60	0.679	13.6
Sinc	CC	12.7	7.10	0.219
	MMC	27.9	6.56	0.197

En la Tabla 1 se aprecia cómo una señal de tipo Sinc (seno cardinal) de 30 MHz da un error relativo de 0.197% y de 0.219% al ser analizadas con métodos de mínimos cuadrados y de correlación respectivamente. Esto conlleva a que se recomiende la utilización de este tipo de señales a la hora de replicar la práctica en instancias educativas.

No obstante, señales de tipo Seno a 10 MHz y 20 MHz o de tipo Sinc a 20 MHz, también dan errores relativos menores al 10%, lo cual los convierte en fuertes candidatos a ser las emisiones que se realicen con el láser.

Como comentario final, se destaca la exactitud obtenida en estos resultados, como para el Sinc de 30 MHz (0.197% de error relativo) o para el Seno de 20 MHz (0.679% de error relativo), que es consecuencia del análisis de medio millón de datos, es decir, proviene de 100 series de datos para cada fotodiodo de 2500 muestras por serie. Este volumen de datos facilita la reducción de ruidos y la estabilidad de las estimaciones, reforzando la robustez del método propuesto.

4. Conclusiones

Se ha diseñado y evaluado un montaje experimental que permite determinar la rapidez de la luz a partir de la diferencia de llegada de haces lumínicos a

dos fotodiodos (uno fijo y otro móvil). Este enfoque, está inspirado en experimentos históricos de óptica y da continuidad a las prácticas clásicas de Galileo.

El sistema es de implementación sencilla, robusta y apto para uso en contextos educativos de secundaria y educación terciaria, pudiendo favorecer la comprensión de conceptos de frecuencia de muestreo, caminos ópticos y de delay entre señales.

El análisis de datos se realizó utilizando dos enfoques complementarios: el método de mínimos cuadrados (MMC) y la correlación cruzada (CC) para estimar el delay entre las señales de los dos fotodiodos, lo cual puede ser una oportunidad para enseñar dichas técnicas.

Se obtuvo una estimación de la rapidez de la luz con un error relativo del orden del 0.2% respecto al valor definido por el Sistema Internacional de Unidades (SI) de $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ para una señal de emisión de tipo Sinc (seno cardinal) de 30 MHz. Esta exactitud respalda tanto el montaje experimental como los métodos de análisis empleados.

Como perspectivas a futuro, se propone realizar la medición en agua u otros medios. Asimismo, se planea explorar la automatización del desplazamiento del fotodiodo móvil, de manera que el experimento pueda llevarse a cabo mediante una única toma de datos. Finalmente, sería de interés diseñar un montaje experimental de menor costo, que facilite su implementación en laboratorios educativos con recursos limitados.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República por poner a nuestra disposición las instalaciones y el equipo instrumental con el cual se llevó a cabo este proyecto.

Adicionalmente, agradecemos a nuestros colegas Patricia Rodríguez, Aron Kahrs, Nicolás Sigales, Camila Sedofeito y Juan Pedro Tarigo por las charlas y discusiones acerca del montaje experimental para este proyecto.

6. Referencias

- Aoki, K. y Mitsui, T. (2008). A tabletop experiment for the direct measurement of the speed of light. *Am. J. Phys.* 76, 812.
- Carlson, J. (1996). Speed of light measurement with the láser pointer. *Phys. Teach.* 34, 176–177.

Galilei, G. (1954). The first day from Dialogues Concerning Two New Sciences [El primer día de Diálogos sobre dos nuevas ciencias]. Dover.

Greaves, E., Rodríguez, A., y Ruiz-Camacho, J. (2009). A one-way speed of light experiment. *American Journal of Physics*, 77(10), 894-896.

Gülmez, E. (1997). Measuring the speed of light with a fiber optic kit: An undergraduate experiment. *Am. J. Phys.* 65, 614.

Larraín Donoso, T. (2013). Práctica científica en América meridional: Experiencias sobre la velocidad del sonido en Santiago de Chile a fines del siglo XVIII. *Revista de Geografía Norte Grande*, (56), 189-206.

Mak, S. y Yip, D. (2000). The measurement of the speed of light using a láser pointer. *Phys. Educ.* 35(2) 95-100.

Michelson, A. (1879). Experimental Determination of the Velocity of Light. *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*. 71-77.

Resolución 1 de la 26ta CGPM. (2018). Recuperado el 8 de diciembre de 2025. <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1>

Rodríguez, J., Rodríguez-Rodríguez, I., y Martínez, J. (2017). Propuestas para Medir la Velocidad de la Luz en Diferentes Medios dentro de un Ámbito Docente. *Elektron*, 1(2), 66-74.

Parker, W. y Gold, A. (1958). Laboratory Measurement of the Velocity of Light. *Am. J. Phys.* 26, 481.

Toledo Baca, A. y López Varo, P. (2011). Obtención de la velocidad de la luz con un horno microondas. *Revista Española de Física*, 25(2), 50-53.

Tyler, C. (1969). A pedagogical measurement of the velocity of light. *Am. J. Phys.* 49, 740-745.

Vanderkooy, J. y Beccario, M. (1973). An inexpensive, accurate laboratory determination of the velocity of light. *Am. J. Phys.* 41, pp. 272-275.