

Interferómetro de Michelson

Integrantes:

- Valentino Giovannelli-valentinog491@gmail.com
- Juan Manuel Carrizo-jnmcrrz@gmail.com
- Gonzalo Gareis Arnedo-gonzagareis2003@gmail.com

*Laboratorio de ondas, Departamento de Física, Facultad de ciencias exactas de la
Universidad de Buenos Aires*

Resumen:

El objetivo del experimento fue caracterizar cómo varía la diferencia de camino óptico en un interferómetro de Michelson cuando uno de sus espejos oscila mediante un actuador piezoeléctrico. Para poder realizarlo se montó el interferómetro con sus debidos cuidados y se registró la intensidad del patrón de interferencia mediante un fotodiodo. Se logró verificar la relación entre la diferencia de camino óptico y la longitud de onda del haz utilizado, esto gracias a que se obtuvo que la diferencia de camino óptico aumenta linealmente con una pendiente de $(325,0 \pm 12,8)$ nm. Además, se logró calcular la velocidad local del espejo en cada cresta de intensidad obtenida. Obteniéndose que su variación fue de unos pocos nanómetros por segundo alrededor de 145 nm/s, verificando la estabilidad del sistema.

Introducción:

La interferencia es un fenómeno ondulatorio que aparece cuando dos o más ondas coherentes se superponen en un mismo punto del espacio. Dependiendo de cómo coincidan sus fases, la amplitud resultante puede aumentar o disminuir. Cuando las crestas de una onda coinciden con las crestas de la otra, la intensidad se refuerza y se observa interferencia constructiva; cuando crestas coinciden con valles, las ondas se cancelan parcialmente y aparece interferencia destructiva.

Este efecto produce patrones característicos de franjas claras y oscuras, cuya forma depende de la diferencia de caminos recorridos por las ondas antes de reencontrarse. La interferencia es una manifestación directa de la naturaleza ondulatoria de la luz y constituye la base de numerosos instrumentos ópticos de precisión, entre ellos el interferómetro de Michelson.

Un interferómetro es un dispositivo óptico que divide un haz de luz en dos o más caminos y luego vuelve a recombinarlos para producir un patrón de interferencia.

Ese patrón —formado por franjas claras y oscuras— surge de la superposición coherente de los haces al reunirse, y depende de las diferencias de camino óptico que cada uno recorrió.

El interferómetro de Michelson es un instrumento óptico que pertenece a los interferómetros por división de amplitud. En ellos, un frente de ondas proveniente de una fuente puntual se divide en dos haces mediante reflexiones y transmisiones parciales en un divisor de haz. Aunque los haces resultantes pueden tener distinta amplitud, siguen siendo coherentes porque provienen del mismo frente de ondas y mantienen su diferencia de fase mientras los caminos ópticos no difieran más que la longitud de coherencia.

En el interferómetro de Michelson, la luz se divide en dos direcciones ortogonales, cada una dirigida hacia un espejo. Tras reflejarse, ambos haces regresan al divisor y se recombinan, produciendo un patrón de interferencia que depende exclusivamente de la diferencia de caminos ópticos entre ambos brazos. Cuando uno de los espejos se desplaza una distancia x , el camino óptico (ΔL) recorrido por ese haz cambia en:

$$\Delta L = 2x, \quad (1)$$

ya que la luz recorre el trayecto espejo–divisor dos veces. Este cambio de camino óptico modifica la diferencia de fase ($\Delta\phi$) entre los haces:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L, \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz utilizada, en este caso $\lambda = 650 \text{ nm}$, y por lo tanto el patrón de interferencia se desplaza. Cada vez que la fase cambia 2π , el patrón vuelve a su posición inicial, lo que corresponde a un desplazamiento. Esto define la condición de máximos de interferencia:

$$\Delta\phi = 2\pi N \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = 2\pi N, \quad (3)$$

donde N es el número de máximo de interferencia, y despejando:

$$\Delta L = N\lambda, \quad (3.1)$$

Pero como, según la ecuación (1), resulta finalmente:

$$x_N = \frac{N\lambda}{2}. \quad (3.2)$$

Es decir, cada máximo o mínimo observado (x_N) corresponde a un desplazamiento real del espejo de $\frac{\lambda}{2}$. Esta relación es exactamente la utilizada en el procesamiento computacional posterior, donde se identifican los máximos de intensidad para reconstruir $\Delta L(t)$. Notar que esta relación vale para todo pico N hallado, lo cual significa que la distancia entre los puntos máximos de las crestas es constante.

Asimismo, la intensidad resultante al recombinar ambos brazos puede escribirse como:

$$I(t) = I_0 [1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(t))], \quad (4)$$

donde I_0 es la intensidad inicial del haz previo al montaje experimental. Esto resulta ser, precisamente, la señal registrada por el fotodiodo.

La periodicidad temporal de esta señal refleja directamente la evolución temporal del camino óptico, permitiendo estudiar el movimiento del espejo. Esto debido a que, si bien la longitud del camino óptico es constante, la diferencia temporal entre un máximo y su

siguiente no debe serlo necesariamente a causa del ruido y la imperfección del elemento de medición, el espejo con piezoeléctrico.

Al considerar el montaje experimental del interferómetro de Michelson es preciso notar que la posición del espejo en función del tiempo no es ideal, su tasa de cambio es producto del voltaje del piezoeléctrico así como de las condiciones ambientales del laboratorio. Por lo tanto, el análisis de la variación temporal y espacial del espejo no es trivial y se considera la siguiente fórmula:

$$v = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta t}, \quad (5)$$

donde Δt es la variación temporal de la diferencia de camino óptico entre máximos de crestas de interferencia. Esto resulta en la velocidad local del espejo para cada intervalo de medición.

La gran sensibilidad de esta configuración permite medir longitudes de onda o desplazamientos extremadamente pequeños. El patrón observado puede adoptar diferentes geometrías (líneas rectas, hipérbolas o circunferencias concéntricas) según la orientación relativa del divisor y los espejos. Este principio convierte al interferómetro de Michelson en una herramienta fundamental en óptica de precisión y metrología. Con el fin de analizar el movimiento del espejo y la diferencia de camino óptico, se utilizarán todos los argumentos tanto geométricos como analíticos mencionados previamente.

Desarrollo experimental:

En la figura 1 puede observarse el diseño experimental montado, para el cuál fueron necesarios un láser rojo, un divisor de haz, 2 espejos, E1 y E2, con la particularidad de que E2 posee un piezoeléctrico, un generador de funciones, que alimenta dicho piezoeléctrico, un objetivo de microscopio, y por último un fotodiodo, cuya función es la de medir la intensidad de los mínimos en el patrón de interferencia producto del desfase y anulación de amplitudes entre las ondas de los brazos del montaje descrito por las ecuaciones (2), (3) y (4).

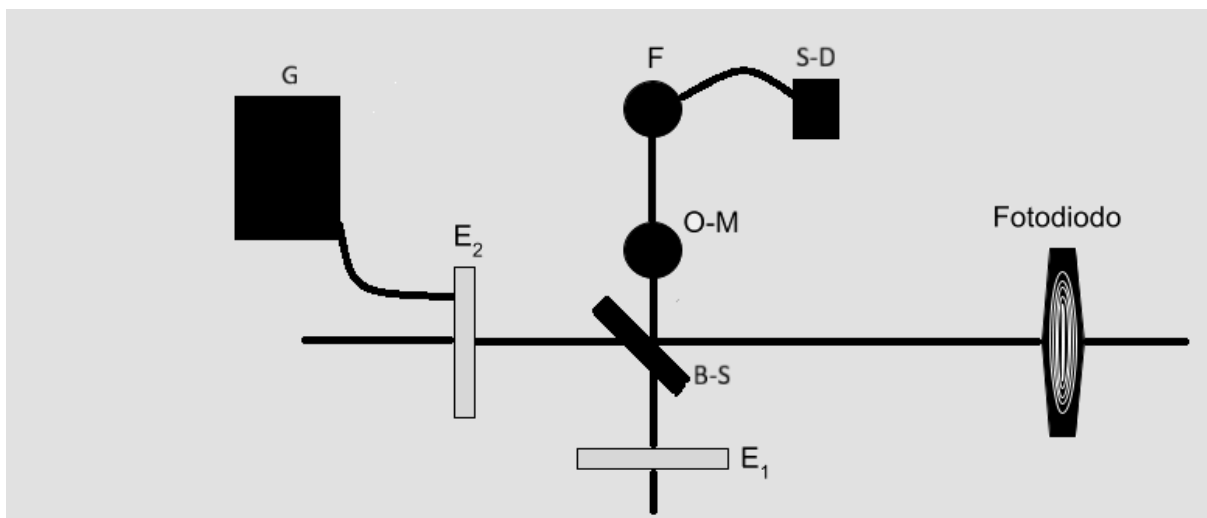


Figura 1. Interferómetro de Michelson. La luz emitida por la fuente F atraviesa el objetivo de microscopio (O-M) y es dividida por el beam-splitter (B-S). Una parte del haz se transmite hacia el espejo E1, se refleja y vuelve al B-S. La otra parte se refleja inicialmente hacia el espejo E2, regresa y se transmite nuevamente a través del B-S. La superposición de ambos haces genera el patrón de interferencia, que es finalmente detectado por el fotodiodo, cuyos datos medidos fueron computarizados a través del sensor DAQ (S-D).

Para que se logre observar el patrón de interferencia, se tuvo el cuidado de alinear cada parte del experimento. Esto debido a que es necesario que el haz pase por el medio de cada espejo para luego unirse en un punto. A su vez, el objetivo de microscopio fue de vital relevancia en el montaje, ya que permitió el aumento de la imagen producida por el interferómetro.

Una vez montado el interferómetro y obtenido el patrón de interferencia con contraste suficiente para identificar el mínimo principal, se posicionó el fotodiodo sobre dicho mínimo. Luego, mediante el piezoeléctrico asociado al espejo E2, se aplicó una frecuencia controlada para inducir una oscilación en la posición del mínimo. Esta oscilación fue registrada por el fotodiodo y digitalizada a través del sistema DAQ. El fotodiodo registra la intensidad $I(t)$, descrita por la ecuación (4). La variación temporal proviene exclusivamente del desplazamiento del espejo E2.

Para desplazar el espejo E2, se utilizó un generador de funciones configurado en modo rampa, dado que esta forma de onda permite obtener un desplazamiento casi lineal del espejo durante cada ciclo. Esto facilita identificar con claridad el corrimiento del mínimo de interferencia a lo largo del tiempo.

Se realizaron mediciones para diferentes frecuencias de modulación, seleccionadas de modo tal que el período fuera suficientemente largo como para observar en detalle las oscilaciones de la posición del mínimo. Se utilizaron 5 frecuencias distintas comprendidas en el rango de 50 mHz a 200 mHz.

En todos los casos, el actuador piezoeléctrico se alimentó con una amplitud de 20 Vpp, valor elegido para asegurar un desplazamiento apreciable del espejo sin comprometer la estabilidad mecánica del montaje.

El objetivo de este procedimiento fue medir el desplazamiento entre máximos de intensidad, a fin de determinar la diferencia de camino óptico producida por la modulación aplicada al espejo, y la variación temporal entre dichos puntos, con el fin de obtener la velocidad local del espejo en intervalos acotados y analizar el funcionamiento del equipo.

Resultados:

Las señales analizadas en este experimento fueron obtenidas mediante un fotodiodo y son producto de la vibración de un sistema piezoeléctrico-espejo. Es por esto que, como se puede observar en las figuras 2 y 3, las curvas que se esperan obtener presentan fluctuaciones rápidas superpuestas debido a ruido electrónico, vibraciones mecánicas y limitaciones del piezoeléctrico. Por lo tanto, se requiere suavizar las curvas mediante métodos computacionales (curvas naranjas) para la óptima adquisición de máximos. El suavizado empleado reduce el ruido sin desplazar las posiciones de los máximos.

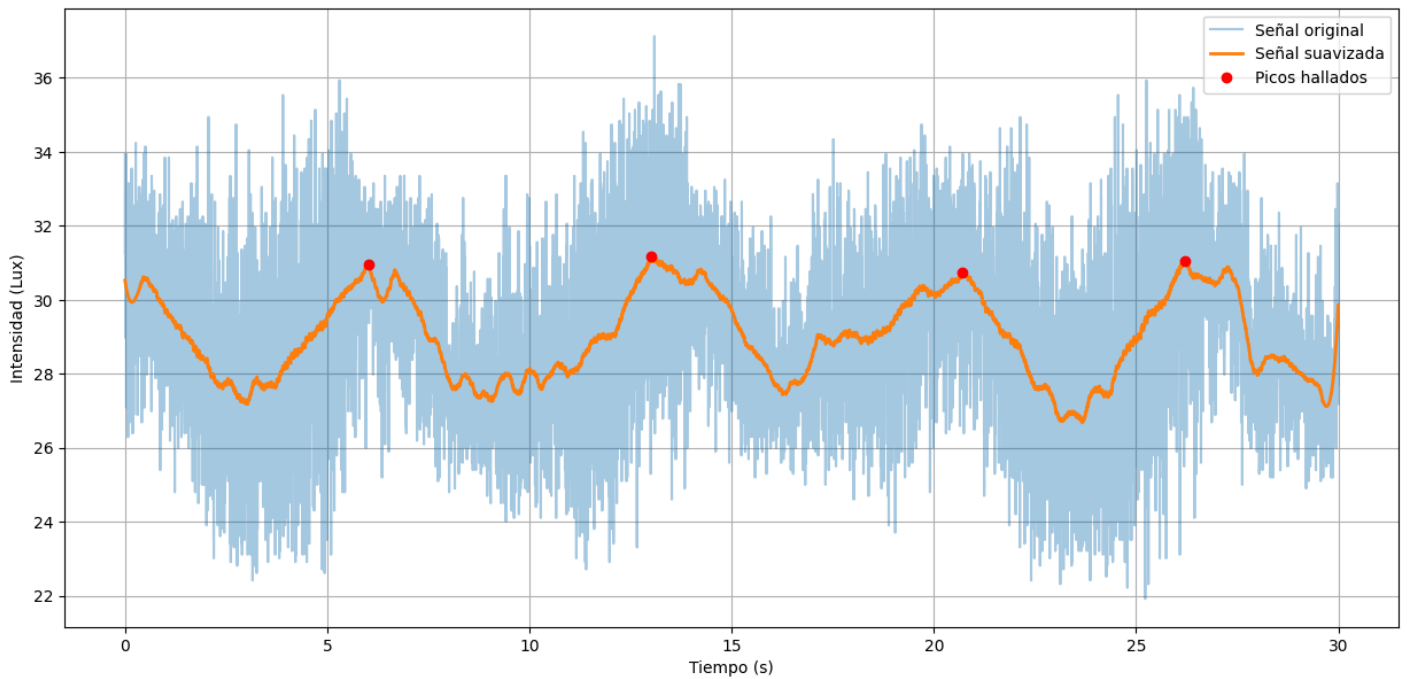


Figura 2: Gráfico de señal original (azul) y suavizada (naranja) obtenida por el fotodiodo para una frecuencia de 50 mHz, una amplitud de 20 Vpp y un tiempo de adquisición de 30 segundos. En rojo, los máximos de intensidad lumínica detectados.

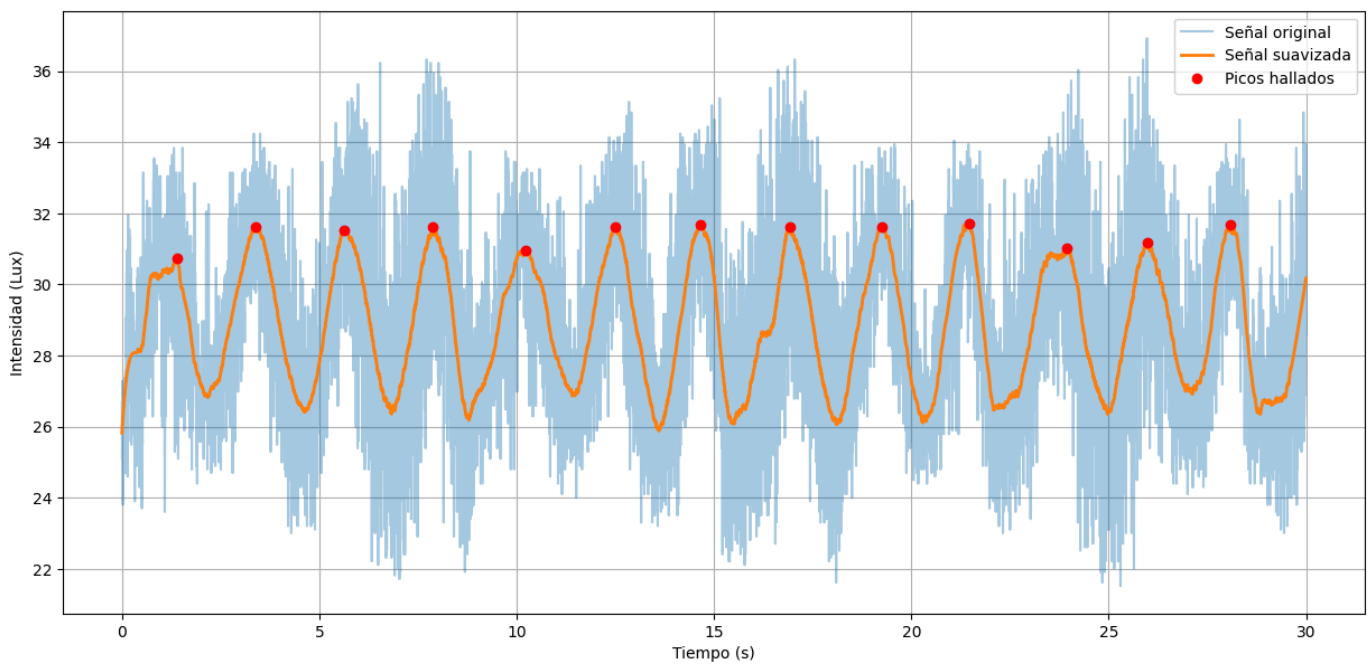


Figura 3: Gráfico de señal original (azul) y suavizada (naranja) obtenida por el fotodiodo para una frecuencia de 150 mHz, una amplitud de 20 Vpp y un tiempo de adquisición de 30 segundos. En rojo, los máximos de intensidad lumínica detectados.

En las figuras 4 y 5 se pueden observar los ajustes lineales de la diferencia de camino óptico en función del número de pico para las frecuencias de 50 mHz y 150 mHz, respectivamente. Como establece la ecuación (3.2), cada máximo consecutivo aparece cuando la diferencia de caminos ópticos cambia en una cantidad igual a la mitad de la longitud de onda del láser utilizado. En consecuencia, la pendiente teórica del ajuste debe

ser $\frac{\lambda}{2} = 325 \text{ nm}$ para un láser de 650 nm, valor que es precisamente el que se busca contrastar experimentalmente.

La pendiente obtenida para la frecuencia de 50 mHz fue de $(325,0 \pm 86,9) \text{ nm}$, mientras que para la frecuencia de 150 mHz, $(325,0 \pm 12,8) \text{ nm}$. Ambos resultados son compatibles con el modelo teórico dentro de sus incertidumbres.

No obstante, se observa que la medición de 50 mHz presenta una dispersión significativamente mayor. Esto se debe principalmente a que, al tratarse de una frecuencia baja, la señal contiene menos máximos dentro del intervalo temporal registrado. Una menor cantidad de puntos reduce la robustez estadística del ajuste, haciendo que el ruido electrónico y las perturbaciones mecánicas del montaje impacten de manera más notable en la pendiente medida.

Por el contrario, la señal correspondiente a 150 mHz incluye un número mucho mayor de máximos, lo que permite un ajuste lineal más estable y con menor incertidumbre. Cuantos más picos se detectan, más suavemente se promedia el ruido y más fielmente se recupera la relación lineal entre el número de máximo y la diferencia de camino óptico. Esto explica por qué la dispersión disminuye aproximadamente en una proporción coherente con la cantidad de datos disponibles en cada caso.

Es importante resaltar que, a pesar de las diferencias en precisión, ambos ajustes presentan una linealidad claramente marcada, lo cual constituye una verificación directa del comportamiento ideal del interferómetro. Si existieran problemas de alineación, defectos ópticos significativos o un movimiento no monótono del piezoeléctrico, las figuras 4 y 5 mostrarían patrones irregulares difíciles de ajustar linealmente. La linealidad observada, por el contrario, indica que los brazos del interferómetro permanecieron estables durante la medición y que el espejo montado en el piezoeléctrico se desplazó de manera aproximadamente uniforme en la región analizada.

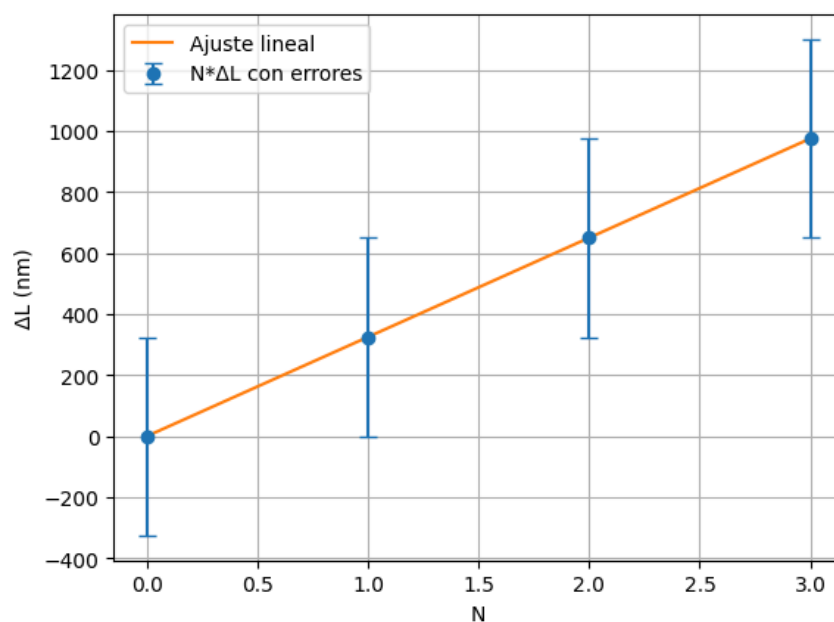


Figura 4: *Ajuste lineal* (naranja) realizado sobre mediciones de diferencia de camino óptico ΔL en función del número de máximos de interferencia N de una señal de 50 mHz. Las mediciones están graficadas con sus respectivos errores obtenidos de la propagación de error de la ecuación (3.1)

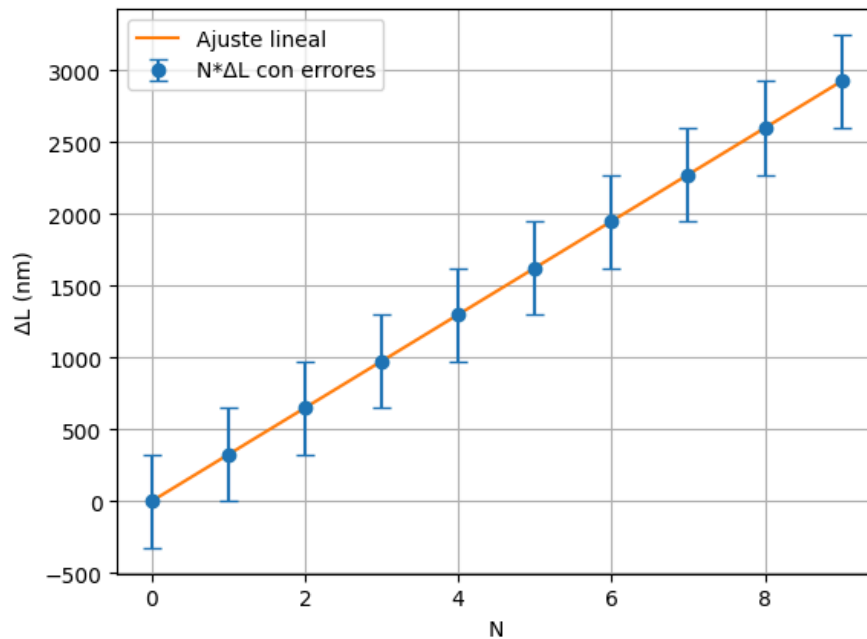


Figura 5: *Ajuste lineal* (naranja) realizado sobre mediciones de diferencia de camino óptico ΔL en función del número de máximos de interferencia N de una señal de 150 mHz. Las mediciones están graficadas con sus respectivos errores obtenidos de la propagación de error de la ecuación (3.1)

Otro resultado obtenido fue la diferencia de tiempo entre los picos para la frecuencia de 150 mHz, cómo se puede observar en la figura 6 la diferencia de tiempo se mantuvo en un rango considerablemente estrecho, lo cual indica la estabilidad del sistema montado, además de evidenciar que el espejo oscilaba uniformemente. Las pequeñas variaciones entre la diferencia de tiempo podrían deberse a las condiciones aleatorias del laboratorio, así cómo a interferencias. Cómo por ejemplo algún ruido durante la medición o alguna falla en el piezoeléctrico.

Se ha de notar que la diferencia temporal entre picos debería ser constante si la velocidad del espejo fuera lineal. Para visualizar mejor esta relación, posteriormente se analizará la velocidad local del espejo entre cada máximo.

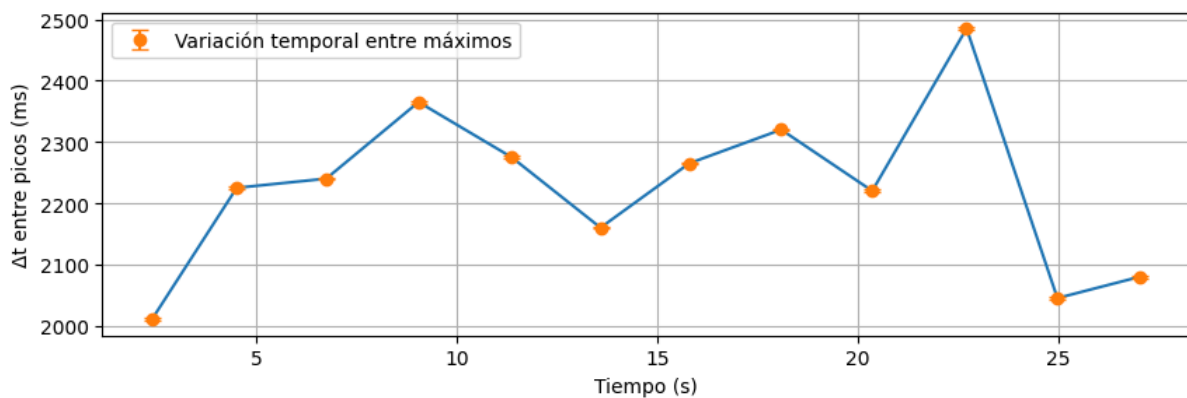


Figura 6: Gráfico de diferencia temporal de adquisición de las muestras de máximos de interferencia en función del tiempo de muestreo del fotodiodo. Los datos están graficados con sus respectivos errores obtenidos mediante la desviación estándar de los mismos.

Una vez obtenida la diferencia de tiempo entre picos fue posible calcular la velocidad local del espejo en cada cresta. La figura 7 muestra la velocidad local del espejo calculada entre pares consecutivos de máximos de interferencia, utilizando la relación (5). Esta magnitud permite caracterizar el movimiento real del actuador piezoeléctrico con una resolución temporal limitada únicamente por la aparición de picos en la señal interferométrica.

En un régimen ideal —es decir, un actuador perfectamente lineal, sin acoplamiento mecánico y operando en ausencia de ruido— la velocidad calculada debería ser constante en todo el intervalo temporal, ya que el espejo se desplaza mediante una señal de rampa aproximadamente lineal. Sin embargo, el gráfico revela pequeñas fluctuaciones alrededor de un valor medio prácticamente constante.

En primer lugar, la presencia de variaciones acotadas indica que el movimiento impuesto por el piezoeléctrico no es perfectamente uniforme.

Este comportamiento es esperable debido a factores como: la no linealidad del piezoeléctrico, el acoplamiento mecánico del sistema piezoeléctrico-espejo (en un montaje previo al realizado en este experimento el piezoeléctrico y el espejo forman cierto ángulo entre sí, lo que provocaba que el patrón de interferencia se desplazará de manera transversal) y ruido del ambiente.

A pesar de estos factores, lo más notable es que la velocidad no presenta tendencias sistemáticas, sino que oscila de manera leve alrededor de un valor aproximadamente constante.

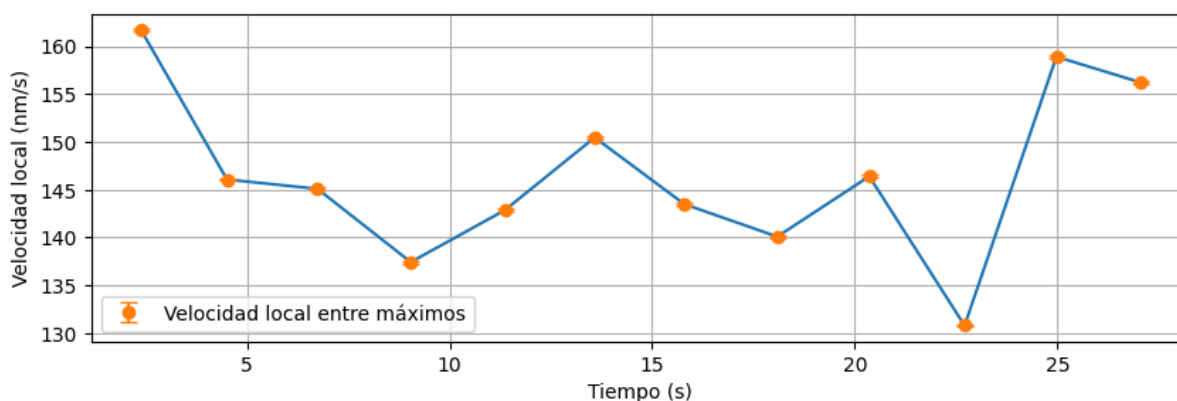


Figura 7: Gráfico de velocidades locales del espejo entre máximos de interferencia detectados en función del tiempo de muestreo del fotodiodo. Los datos están graficados con sus respectivos errores obtenidos mediante la propagación de error de la ecuación (5).

Conclusiones:

En conclusión el experimento permitió no solo apreciar el patrón de interferencia esperado, si no también la posibilidad de caracterizar la diferencia de camino óptico, la velocidad local del espejo y la diferencia de tiempo entre picos de intensidad.

Fue posible verificar la relación entre la longitud de onda del láser utilizado y la diferencia de camino óptico provocada por la oscilación del piezoeléctrico, en este caso se vio que para una frecuencia de 150 mHz el camino óptico aumenta linealmente con una pendiente de $(325,0 \pm 12,8)$ nm, la cual valida el resultado teórico esperado de que la diferencia de camino óptico es de media longitud de onda.

A su vez se verificó la relación entre la diferencia de tiempo entre los picos y la velocidad local del espejo en cada cresta. Se logró obtener valores precisos de estas características para 150 mHz de frecuencia y verificar la estabilidad del interferómetro bajo esa oscilación del piezoeléctrico. Al considerar que la variación de velocidad (y, en consecuencia, la variación temporal entre picos) fue de unas pocas decenas de nanómetros por segundo alrededor de un valor central, se considera que el método interferométrico permite estimar velocidades locales con buena resolución, las cuales son consistentes en un sistema realista.

Es importante resaltar las limitaciones del experimento realizado, primeramente es un sistema altamente sensible, el cual requiere de tiempo para su correcto armado. Por ejemplo, se debe tener cuidado al alinear el haz cada vez que este rebota en un espejo. Además debe contarse con espejos calibrables debido a que la parte final de la alineación requiere juntar ambos haces en un mismo eje óptico. Otro requerimiento importante es que tanto los espejos como el beam splitter estén limpios, ya que la mas mínima mancha puede arruinar el patrón de interferencia.

Por último es necesario destacar la alta sensibilidad del experimento ante condiciones ambientales externas, las cuales pueden no estar bajo el control del experimentador. Por ejemplo el ruido ambiental o alguna vibración externa podrían influir en el patrón y así afectar la medición.

Bibliografía:

- Depine, R.A, *Ondas*, 2020, Capítulo 8: Interferencia
- Martínez, O.E, *ONDAS: ES FÍSICA*, 2008, Capítulo 9: Interferencia.
- N. Bruce y I. Montes-González, "Demonstrating optical-path compensation in a Michelson interferometer", 2024