

# **SENSOR DE TEMPERATURA BASADO EN UN INTERFERÓMETRO DE MICHELSON**

## *TEMPERATURE SENSOR BASED IN MICHELSON INTERFEROMETER*

***Leosiel Haret Villalobos Briseño***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México  
*a274217@alumnos.uaslp.mx*

***Paola Yurem Pérez Gómez***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México  
*a307057@alumnos.uaslp.mx*

***Amparo Rodríguez Cobos***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México  
*amparo.rodriguez@uaslp.mx*

***José Antonio Álvarez Salas***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México  
*jaas@uaslp.mx*

**Recepción:** 24/noviembre/2023

**Aceptación:** 26/diciembre/2023

### **Resumen**

En el presente trabajo se reporta la implementación de un sensor de temperatura basado en un interferómetro de Michelson. El sensor implementado constituye un primer demostrador cuyo análisis permite una calibración en un rango de hasta 30 °C con una resolución de 1 °C. El procesamiento de los interferogramas generados se lleva a cabo mediante Python. El algoritmo desarrollado permite manipular patrones de interferencia en tiempo real, así como también filtrar vibraciones parásitas del ambiente que perjudican la adquisición de las imágenes. Los resultados del análisis, el sistema implementado y el algoritmo desarrollado pueden aplicarse a otros sistemas interferométricos mediante mínimas adaptaciones que permitan tratar interferogramas dinámicos con diferentes geometrías.

**Palabras Clave:** Medición remota de temperatura, Procesamiento de imágenes, Procesamiento de interferogramas, Sensores interferométricos.

## **Abstract**

*In this work we present the results obtained by an implemented temperature sensor based in a Michelson interferometer set up. The results of the analysis are used in the characterization of the sensor with a sensing range of 30°C and 1°C like resolution. The interferometer patterns are processed by Python in real time, it allows vibration noise filtering and to treat different interference patterns. The implemented set up and the results of the analysis can be applied to other interferometric devices. The ongoing work aims to improve the experimental results.*

**Keywords:** *Interferometer pattern processing, Interferometry sensors, Image processing, Remote temperature sensor.*

## **1. Introducción**

A diferencia de otros parámetros físicos fundamentales como la distancia y el tiempo, la temperatura es un parámetro que no puede medirse directamente. Para conocer su valor es necesario medir los cambios cuantificables de propiedades físicas que se vean alterados con los cambios de temperatura; como el cambio del volumen del mercurio que constituye un termómetro [Szczerka, 2022]. El análisis y control de múltiples procesos se llevan a cabo mediante la medición de la temperatura que dependiendo de las condiciones ambientales se requiere hacerlo a distancia. Por ello, se han desarrollado sensores ópticos tanto de propagación libre como de fibra óptica que ofrecen mediciones remotas en un amplio rango y con resoluciones muy finas, no solo de la temperatura si no de diversos parámetros físicos [Mikolajek, 2020].

En el ámbito de la metrología óptica se aplican las técnicas interferométricas en el sensado o calibración de diversos parámetros como, por ejemplo, de distancia [De Groot, 2001], campos eléctricos [Badami, 2018], temperaturas o componentes químicos [Krohn, 2015], por mencionar algunos. De entre las ventajas de los instrumentos interferométricos de medición se pueden destacar que son dinámicos, de gran precisión y no invasivos. En este tipo de sistemas, el análisis de los interferogramas requiere de técnicas basadas en algoritmos matemáticos que demandan de un nivel avanzado tanto de matemáticas [Deck, 2003] como de

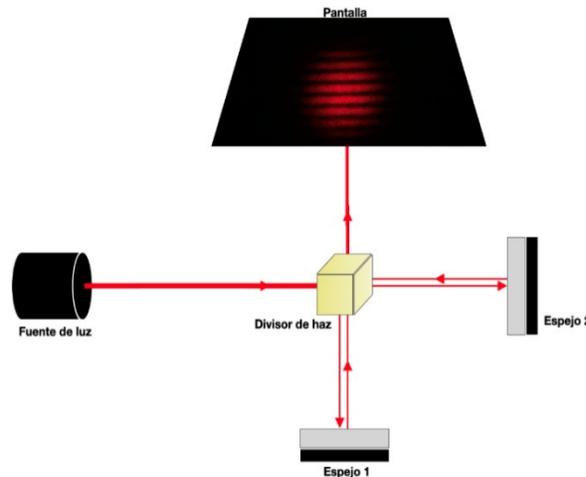
programación [De Groot, 1995]; teniendo como segunda opción la adquisición de software de alto costo y con aplicaciones muy puntuales.

En el laboratorio en el que se desarrolló este trabajo se implementan sistemas interferométricos de metrología óptica con el fin tanto de sensar diferentes parámetros como de evaluar la geometría y el grado de planicidad de superficies reflectoras y dieléctricas. De la misma forma, se busca la aplicación de diferentes softwares con el fin de encontrar el más adecuado de acuerdo con nuestras necesidades de procesamiento de interferogramas [Ramírez, 2023].

En el presente trabajo se propone la aplicación de Python en el análisis de los interferogramas resultantes de un sensor de temperatura. Se decidió trabajar con Python debido a las múltiples ventajas que presenta tales como funcionar en cualquier sistema operativo y ser de fácil manipulación y ejecución. Además, al ser Python un lenguaje de alto nivel, permite realizar las mismas tareas que se pueden llevar a cabo en LabVIEW con la ventaja de que Python tiene mayor cantidad de aplicaciones en diferentes ámbitos y es de acceso gratuito.

## **2. Métodos**

El sensor de temperatura desarrollado se basa en un interferómetro de Michelson que es uno de los interferómetros más representativos de los interferómetros de división de amplitud [Mantravadi, 2007] y que es posible implementarlo en el laboratorio en el que se desarrolló este trabajo. Este instrumento de medición basa su principio de funcionamiento en la recombinación de dos haces de luz después de recorrer diferentes trayectos. Mediante el tratamiento adecuado de la luz resultante de dicha recombinación se puede obtener información sobre los parámetros físicos que perturbaron a uno de los haces (haz de prueba o sentido) antes de interferir con el haz no perturbado llamado de referencia [Schmit, 2006]. En la figura 1 se resume su funcionamiento, una fuente de luz coherente se divide mediante un divisor de haz en un par de haces con direcciones perpendiculares. Cada uno de los haces incide en un espejo, que después de ser reflejados, se recombinan en el mismo divisor de haz formando un patrón de franjas resultante llamado interferograma el cuál se proyecta en una pantalla o en una cámara CCD.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Montaje experimental del interferómetro de Michelson.

La aplicación del interferómetro de Michelson como sensor se basa en la modulación de la fase del interferograma  $\Delta\varphi$  dada por la ecuación 1. Dicha modulación se debe a la perturbación de la distancia  $\Delta L$  que recorre uno de los haces y que al recombinarse con el haz no perturbado provoca el desplazamiento de las franjas del interferograma inicial (antes de la perturbación). Cuando la imagen del patrón de interferencia es adquirida y se registra el desplazamiento de las franjas de interferencia, es posible determinar  $\Delta\varphi$  y por lo tanto cuantificar el parámetro físico que produce la perturbación considerando que la longitud de onda de la luz ( $\lambda$ ) y el índice de refracción del aire ( $n$ ) son conocidos.

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)n\Delta L \quad (1)$$

Donde:

$\Delta\varphi$  : Diferencia de fase

$\lambda$  : Longitud de onda de los haces de luz

$n$  : Índice de refracción

$\Delta L$  : Diferencia de longitud o trayecto del haz de sentido

Esta fórmula de diferencia de fase se aplica a todos los interferómetros y el trabajo de medición comienza cuando se altera la longitud del trayecto entre los dos haces. En este caso particular, que se trata de un sensor de temperatura, esto sucede cuando se provoca un cambio de temperatura en uno de los espejos, el llamado

espejo de prueba que debido a la expansión térmica del material se dilata y provoca una disminución del trayecto recorrido por el haz de sensado.

El espejo de prueba se dilatará mientras la temperatura aumente, ecuación 2.

$$\Delta L/L = \alpha \Delta T \quad (2)$$

Donde:

$\Delta L$  : Cambio de longitud del espejo

$L$  : Longitud inicial total del espejo

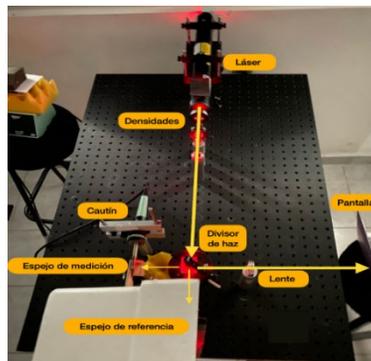
$\alpha$  : Coeficiente de dilatación lineal

$\Delta T$  : Cambio de temperatura

Cabe señalar que en ambas ecuaciones  $\Delta L$  es el mismo parámetro. La diferencia de longitud que se dilata el espejo al calentarlo es la diferencia de trayecto recorrido por el haz de sensado respecto a la longitud recorrida por el haz de luz de referencia.

### **Implementación del sensor interferométrico**

La figura 2 muestra el sensor implementado. Como fuente de luz se tiene un láser He-Ne con una longitud de onda de 633 nm y una potencia de 5 mW.



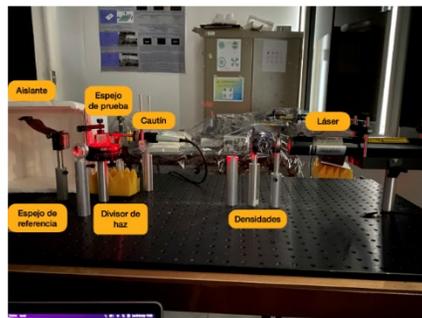
*Fuente: elaboración propia.*

Figura 2 Montaje óptico del sensor de temperatura.

Primero, el láser se hace pasar a través de un par de densidades ópticas que disminuyen la potencia del haz para cerciorarse de trabajar dentro de los límites de seguridad lumínica. Después, el láser incide en un divisor de haz que permite fraccionar el haz en dos haces y los dirige a cada uno de ellos hacia un par de

espejos equidistantes (a 8 cm del divisor de haz). Los haces reflejados se recombinan y llegan a una lente convergente (a 10 cm del divisor de haz) con focal de 4 cm, cuya función es amplificar el patrón de interferencia resultante y de esta forma poder trabajar en el patrón que se observa en la pantalla.

El procesamiento del interferograma resultante se lleva a cabo sustituyendo la pantalla por una cámara de PC o una cámara web conectada a una computadora. Cabe mencionar que este sensor se implementó sobre una mesa óptica amortiguada con arena, esto con el fin de eliminar vibraciones parásitas que debido a la sensibilidad del sistema producen perturbaciones en las mediciones. En este sensor de temperatura, el calentamiento y por lo tanto la dilatación del espejo de prueba se logra añadiendo un caudín al montaje, tal que su resistencia esté completamente en contacto con la parte superior del substrato del espejo, figura 3. Para evitar que el espejo de referencia se vea perturbado por el cambio de temperatura se coloca entre los dos espejos un aislante térmico (caja de unicel).



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 3 Vista lateral del Montaje óptico.

Los espejos utilizados en el montaje óptico se encuentran sujetos a una base de aluminio con tornillos que permiten cambiar su orientación. Al espejo de prueba o sensado se le despojó de dicha base y se le fabricó una base de madera (figura 4) con el fin de que la temperatura solo afecte al espejo y de esta forma poder eliminar la contribución térmica debido a la expansión de la base de aluminio. La base de madera se diseñó específicamente para las dimensiones del espejo de este sensor y el espejo se adhirió a la base con un pegamento térmico que resiste hasta una temperatura de 120 °C.

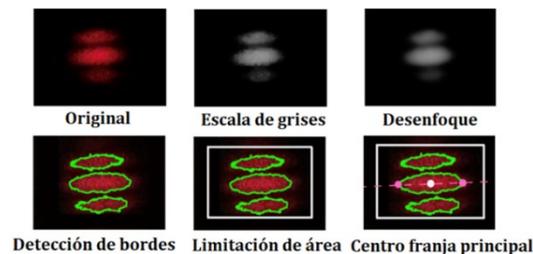


Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Vista trasera del espejo de prueba haciendo contacto con el cautín.

### Procesamiento del patrón de interferencia

El procesamiento dinámico de los interferogramas se lleva a cabo en Python con la librería de open CV que permite manipular el video del patrón en tiempo real y procesarlo. El algoritmo implementado consta de seis apartados, figura 5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Pasos del algoritmo para procesar el patrón de interferencia.

Primeramente, se obtiene el patrón que observa la cámara con la librería de open CV, esto constituye una serie de imágenes llamadas “frame” o cuadros que en conjunto forman el vídeo a procesar con este algoritmo. Después, se procesa cada una de las imágenes adquiridas. Lo primero que se hace es aplicar un filtro de escala de grises para de esta forma trabajar con una imagen de un solo canal evitando trabajar con los comunes 3 canales de una imagen RGB. Posteriormente, se aplica un filtro de “blurring” o también llamado desenfoque, para generar una imagen más suave con bordes no definidos completamente. Este filtro permite detectar más fácilmente las figuras en una imagen y con la ayuda del algoritmo propio de open CV de nombre “canny” se detectan los bordes del patrón de interferencia. Es

importante aplicar correctamente los filtros mencionados ya que de su óptima aplicación depende que funcione el algoritmo de detección de bordes. Debido a que la cámara detecta una gran área y el patrón es muy pequeño se debe de limitar la zona donde se encuentra el patrón de interferencia puesto que en ocasiones debido a cambios de luz en el ambiente se pueden detectar otros bordes que no son de interés para el sensor.

Teniendo en cuenta las condiciones con que se trabajó en el laboratorio, así como también las distancias entre los dispositivos del montaje y la resolución de la cámara (720x1280 pixeles), el área delimitada es de 200x200 pixeles. Es necesario tomar en cuenta que en caso de que se cambie alguno de los parámetros mencionados, el área delimitada puede cambiar. Por último, se encuentra el centro del lóbulo principal o la franja más brillante determinando los extremos de la franja y encontrando el centro con una fórmula de punto medio.

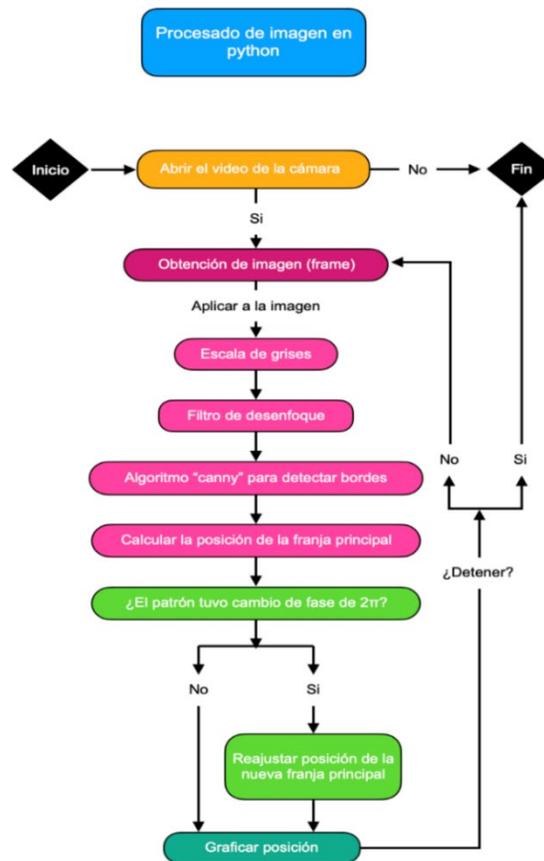
Finalmente, se gráfica la posición, en pixeles, del centro de la franja más brillante del patrón en función del número de frame, esto se realiza en tiempo real con una frecuencia de 4.35 Hz. En el diagrama de flujo de la figura 6 se resumen las diferentes etapas implementadas en Python para el tratamiento dinámico de los interferogramas del sensor de temperatura y que se puede aplicar a cualquier tipo de sensor interferométrico.

### **3. Resultados**

#### **Calibración del sensor**

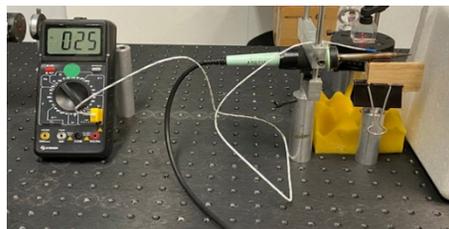
La calibración del sensor se lleva a cabo determinando el corrimiento del número de franjas del interferograma en función de la temperatura aplicada al espejo de prueba o sensado. Las mediciones de temperatura se realizaron con un termopar conectado a un multímetro tomando como referencia la temperatura ambiente promedio de 25 °C (Figura 7).

Primeramente, se encontró que el caudín aumenta su temperatura de manera drástica en aproximadamente 1 minuto mientras que en el mismo tiempo el espejo conserva una temperatura relativamente baja de aproximadamente 60 °C. Esto se puede apreciar en las gráficas de las figuras 8 y 9.



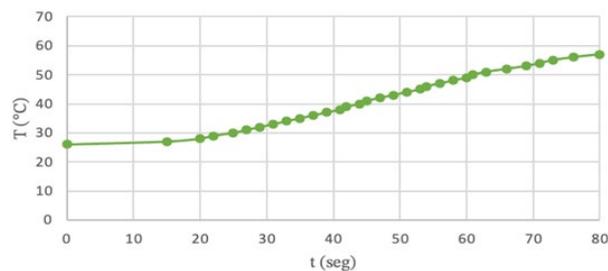
Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Pasos del algoritmo para procesar el patrón de interferencia.



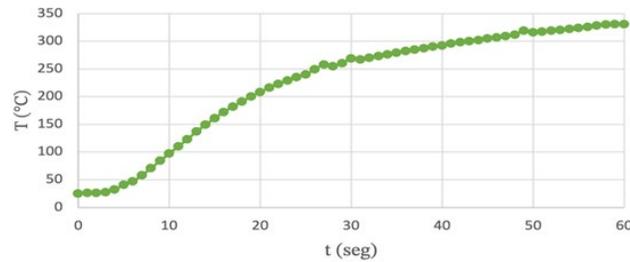
Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Medición de la temperatura del caudín con un termopar.



Fuente: elaboración propia.

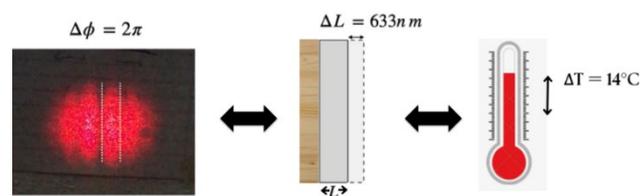
Figura 8 Gráfica de temperatura del espejo de prueba.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Gráfica de temperatura del caudín.

Ahora, sustituyendo en la ecuación 1, el valor de la longitud de onda del láser  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , el índice de refracción del aire  $n = 1$  y la diferencia de fase  $\Delta\phi = 2\pi$ , es decir, el corrimiento de una franja se obtiene que la diferencia de longitud  $\Delta L$  es de  $633 \text{ nm}$ . Esto significa que cada franja que se recorra en el interferograma, el espejo de prueba se expande  $633 \text{ nm}$  que es también la diferencia de trayecto para el haz de sentido respecto al haz de referencia. Sustituyendo este resultado en la ecuación 2, tomando el coeficiente de expansión lineal  $\alpha$  como  $9.81 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$  correspondiente al substrato de vidrio volado del que está hecho el espejo y siendo la longitud inicial del substrato del espejo  $L = 0.5 \text{ cm}$ , se determina que el cambio de temperatura es de  $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es decir, el corrimiento de una franja en el patrón de interferencia respecto a una referencia fija equivale a un cambio de temperatura de  $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$  del espejo de prueba, figura 10.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Relación entre diferencia de fase medida y cambio de temperatura.

## Tratamiento del interferograma

La figura 11 muestra algunos ejemplos de la detección del patrón de interferencia en el programa implementado en Python. La figura 11a corresponde a la forma ideal del interferograma en ausencia de perturbaciones parásitas. En la figura 11b se muestra la imagen de un patrón de interferencia detectado correctamente, pero en

la que el algoritmo percibe una porción iluminada en el extremo superior que no pertenece al interferograma, por lo que en estos casos se necesita limitar el área de detección en el algoritmo. La figura 11c muestra cómo se observa el patrón cuando existe una perturbación acústica e impide encontrar el patrón de interferencia incluso a simple vista en la pantalla, este caso sirve de ejemplo para apreciar como las vibraciones parásitas afectan drásticamente al sensor en caso de que no se encuentre debidamente amortiguada la mesa óptica.

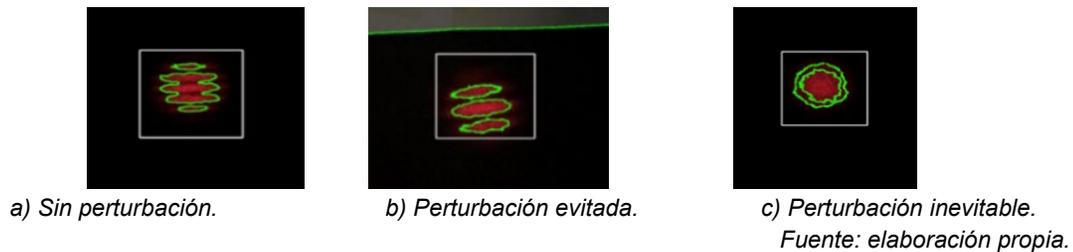


Figura 11 Ejemplos de algoritmos aplicados a varios patrones de interferencia.

#### 4. Discusión

Se observó que al traslapar los haces de referencia y de sensado para obtener el interferograma, el patrón podía cambiar de orientación. Al tener un patrón con orientación vertical y conforme aumenta la temperatura, la orientación del patrón comienza a rotar lo que impide la medición o detección de la franja principal. En cambio, cuando las franjas están horizontales el patrón comienza a aumentar su número de franjas conforme el espejo se calienta, pero sin rotar su orientación. Por esta razón se deduce que es más fácil trabajar con el patrón horizontal. Trabajando de esta forma el patrón debe iniciar aproximadamente con 8 franjas visibles (Figura 12a) y terminar el calentamiento con 3 franjas al final de la medición (Figura 12b).

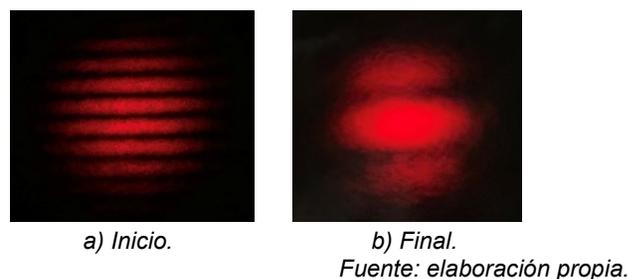
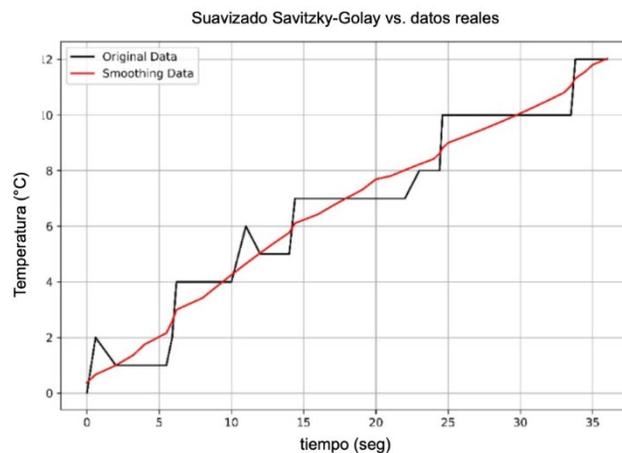


Figura 12 Número de franjas del patrón al iniciar y finalizar la medición.

Dados los resultados de las gráficas de las figuras 8 y 9, se puede calcular la equivalencia de la gráfica que arroja el programa cuyos ejes son número de frames contra posición en píxeles, y cambiar a una gráfica de la variación de la temperatura en grados centígrados en función del tiempo en segundos. Primero, se debe considerar que la frecuencia de medición es 4.35 Hz, es decir, que cada segundo se procesan 4 imágenes y el 35% de una nueva imagen. En cuanto a la temperatura y la posición, 20 píxeles equivalen a 20 °C. El resultado obtenido se puede apreciar en la gráfica de la figura 13.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Gráfica final de la temperatura del espejo en función del tiempo.

Sobre el funcionamiento del algoritmo, es completamente necesario mantener las condiciones que se mencionaron anteriormente ya que de otra forma la calibración del sensor no será la correcta.

Experimentalmente se pudo observar que el sentido del movimiento de las franjas del patrón de interferencia indica el aumento o disminución de la temperatura. Cuando el espejo de prueba se calienta las franjas avanzan hacia arriba y cuando se enfría las franjas avanzan hacia abajo. En esta última observación se determinó cómo es el comportamiento de un caudín ya que al inicio comienza a calentarse hasta llegar a su máxima temperatura, después oscila al prenderse y apagarse para mantener la temperatura máxima, cuando sucedía esto el patrón también comenzaba a oscilar hacia arriba y hacia abajo el corrimiento de las franjas.

## **5. Conclusiones**

El sensor interferométrico implementado es un demostrador de un sensor de temperatura a distancia que permite determinar si el parámetro sensado aumenta o disminuye tan solo con el registro del sentido del movimiento de las franjas del interferograma.

Debido a la gran sensibilidad de este instrumento de medición, se requiere implementarlo en una mesa ópticas amortiguada para disminuir el mayor número de vibraciones parásitas.

Mediante el algoritmo desarrollado en Python es posible procesar interferogramas en tiempo real. Además, permite modificar parámetros tales como la cantidad de filtros utilizados con el fin eliminar perturbaciones acústicas o vibraciones de gran intensidad que persistan a pesar del uso de una mesa óptica amortiguada. Para asegurar el buen desempeño del algoritmo, es necesario que el interferograma bajo estudio se mantenga en posición horizontal en todas las mediciones, dentro del área delimitada y se requiere también colocar la cámara siempre en la misma posición para evitar resultados erróneos.

Por el momento, el rango de medición del sensor implementado es de 30 °C con una resolución de 1 °C y el calentamiento completo del espejo toma 1 minuto aproximadamente; por lo que las perspectivas inmediatas de este proyecto son procurar un calentamiento homogéneo del espejo de prueba. Para ello, se contempla el uso de una celda Peltier en lugar del cautín. Además, se propone encontrar una forma de medir la temperatura inicial para proporcionar al usuario una lectura de la temperatura real en cada instante y que no solamente se registren los cambios de temperatura.

De entre las ventajas de usar Python se puede mencionar que permite ejecutar y manipular fácilmente sus recursos además de que funciona en cualquier sistema operativo y no es un software de paga.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Badami, V. and Abruña, E., Absolutely: small sensor, big performance, MIKRONIEK (1), 5-9, 2018.

- [2] Deck, L. L., Fourier-Transform Phase-Shifting Interferometry, *Applied Optics* 42 (13), pp. 2354-2365, 2003.
- [3] De Groot. P., Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window, *Applied Optics* 34 (22), pp. 4723-4730, 1995.
- [4] De Groot, P., Unusual techniques for absolute distance measurement, *Optical Engineering* 40 (1), 28-32, 2001.
- [5] Krohn, D. A., MacDougall, T. W., and A. Mendez, *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*, 4th ed., Vol.PM247, SPIE Press, 2015.
- [6] Mantravadi, M. V. and Malacara, D., Newton, Fizeau, and Haidinger Interferometers, in *Optical Shop Testing*, edited by D. Malacara, pp. 361-394, Wiley-Interscience, 2007.
- [7] Mikolajek, M.; Martinek, R.; Koziorek, J.; Hejduk, S.; Vitasek, J.; Vanderka, A.; Poboril, R.; Vasinek, V.; Hercik, R. Temperature Measurement Using Optical Fiber Methods: Overview and Evaluation. *J. Sens.*, 2020.
- [8] Ramírez, J. A.; Cerrillo J. D.; Rodríguez A.; Alvarez J. A., *Pistas educativas*, Vol. 44, No. 144; pp. 663- 675, 2023.
- [9] Schmit, J., Creath, K. and Wyant, J. C., Surface Profilers, Multiple Wavelength, and White Light Interferometry, in *Optical Shop Testing*, edited by D. Malacara, pp. 667-755, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [10] Szczerska, M., (2022). Temperature Sensors Based on Polymer Fiber Optic Interferometer, *Chemosensors* vol. 10, no. 6: pp. 228. <https://doi.org/10.3390/chemosensors1006022>.