

Artículo

**Del Codo al efecto Vernier:**  
Un viaje a través de la  
historia de la medición y  
su aplicación en sensores  
de fibra óptica

Iván Hernández Romano  
Sigifredo Marrujo García  
Laura Giselle Martínez Ramírez  
Miguel Cipriano Guzmán Cano

Artículo

# Del Codo al efecto Vernier: Un viaje a través de la historia de la medición y su aplicación en sensores de fibra óptica

**Cómo citar este artículo:** Hernández-Romano I, Marrujo-García S, Martínez-Ramírez LG, Guzmán-Cano MC. 2024. Del Codo al efecto Vernier: Un viaje a través de la historia de la medición y su aplicación en sensores de fibra óptica. Revista Ciencia y Naturaleza (1103).





## *Del Codo al efecto Vernier*

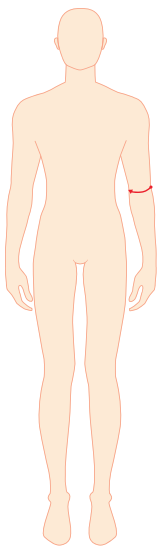
**L**a primera medición hecha en el mundo, al igual que su historia, es imposible de saber exactamente cuándo y dónde se realizó e igualmente difícil de imaginar. Sin embargo, la historia de la medición acompaña nuestra propia historia como humanidad. Medir nos permitió entender el mundo y sus límites, y con ello cambiarlo; esto a su vez, estimuló nuestra imaginación para crear nuevas formas de comparar una porción de realidad con otra.

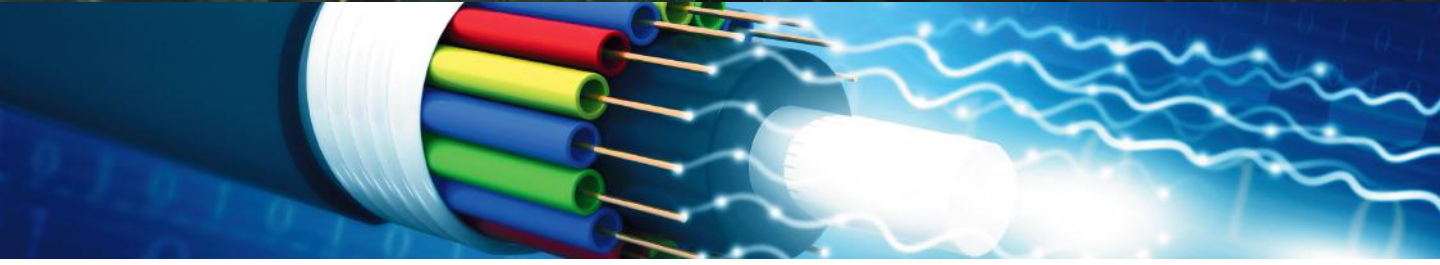
Quizá fue obra de nuestros sentidos lo que convirtió noches y días en un sistema empírico para medir tiempo y eventualmente distancia. Pero ¿Cómo? y ¿Por qué? y antes de empezar ¿Dónde empezó?

## *El origen*

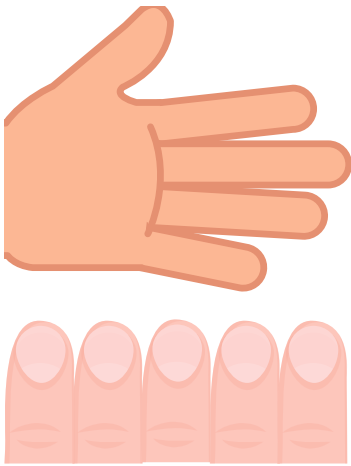
Los antecedentes de la medición hunden sus raíces hasta los antiguos Egipto y Babilonia. Se cree que fueron estas civilizaciones las primeras en implementar sistemas estandarizados de medición en la astronomía, el comercio y la construcción. El codo fue la unidad estándar de medida de longitud en ambas civilizaciones, y de muchas otras civilizaciones como los griegos, los romanos o los persas. Todas estas medidas en codos tenían variaciones respecto a cómo se llevaba a cabo la medida. Muchas unidades de medición en esa época se basaban en lo mejor que teníamos a nuestro alcance para medir, nuestro cuerpo. Por ejemplo, el codo es la distancia desde el codo hasta la punta del dedo medio, unidad de medida demasiado arbitraria, pero que todos la llevamos siempre con nosotros.

Pese a las limitantes, esto permitió construir monumentos a sus Dioses y reyes, y mapear las constelaciones del cielo con gran exactitud. Conforme los instrumentos de medición se desarrollaron se convirtieron en una herramienta de poder y autoridad con las cuales los poderosos moldeaban el mundo a su antojo.





Para realizar mediciones de longitudes más pequeñas y precisas es necesario usar subdivisiones de las unidades de medición que ya se tenían. Se podría pensar que dividir el codo de manera simétrica en unidades menores sería la opción lógica. Sin embargo, esto pasa por alto el razonamiento que siguieron nuestros antepasados al momento de usar su cuerpo para medir.



El dedo (su ancho) era la unidad más pequeña por excelencia, de modo que había 28 dedos en un codo; 4 dedos en una palma; 5 dedos en una mano; 3 palmas en un tramo pequeño y muchas y variadas mediciones que nacían de la misma línea de pensamiento. De ser necesarias unidades aún más pequeñas que un dedo se utilizaban fracciones unitarias de ese mismo dedo, por ejemplo, un  $\frac{1}{2}$  de dedo; un  $\frac{1}{3}$  de dedo; un  $\frac{1}{4}$  de dedo, etc.

Con el tiempo estos sistemas de medición fueron adoptados y modificados por otros pueblos, por ejemplo, en Europa se basaron en el sistema métrico de los romanos, quienes a su vez tomaron inspiración de los griegos y estos últimos lo derivaron de los sistemas egipcios y babilónicos. Todo esto se dio, como no podría ser otra forma, gracias al comercio, esta fue la razón principal para que las unidades de medida se difundieran fuera de las áreas que las vieron nacer.



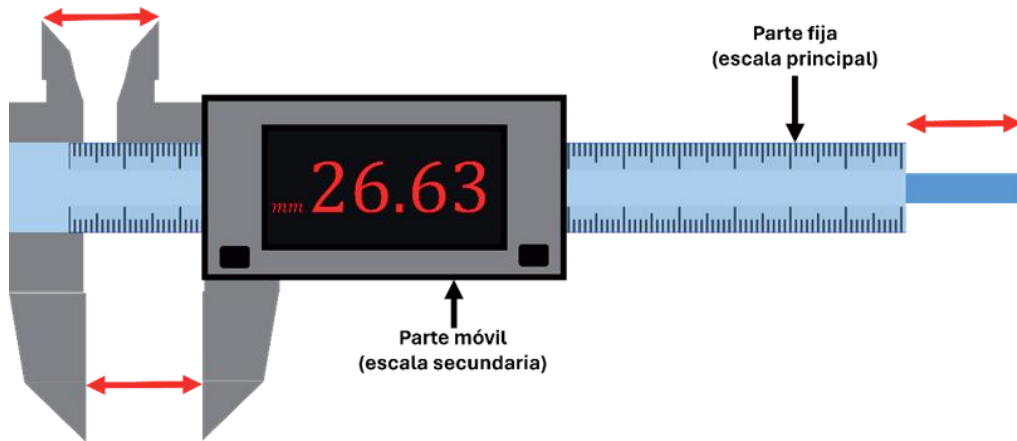


## *La evolución*

En Inglaterra, Francia y el resto de los países europeos, las formas de medir evolucionaron de manera muy diversa. En Francia, por ejemplo, esta diversidad en las formas de medir era tan grande que se estima que dicho país tenía unas 250.000 unidades diferentes de distinto tamaño. Sin embargo, tal diversidad de pensamiento no fue necesariamente mala. En un intento de tener mayor precisión se buscaron nuevas formas de medir y entre ellas apareció el uso de la **doble escala**, que permitió a los astrónomos aumentar la precisión de sus mediciones y con esto reducir la incertidumbre.

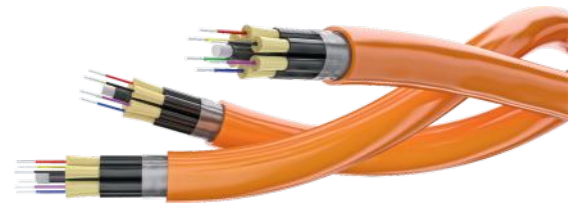
El uso de una segunda escala como medida de apoyo no era algo nuevo. La vara de Jacob se apoyaba de una línea en diagonal dibujada entre dos valores formando una letra "N", con la cual se mejoraba la precisión de las mediciones. Se sabe que este instrumento fue inventado a principios del siglo XIV, sin embargo, se tiene registro de que esta técnica fue inventada un siglo antes. Pese a que la técnica se popularizó, principalmente en instrumentos astronómicos, otras escalas secundarias la reemplazaron por su mayor versatilidad y precisión. Una de ellas fue el Nonio, inventado por el astrónomo portugués Pedro Nunes en el siglo XVI. Pese a su gran precisión, este no gozaría de gran popularidad, sin embargo, serviría de inspiración para el matemático francés Pierre Vernier, quien un siglo después inventaría el instrumento que lleva su nombre, el "calibrador Vernier", estableciendo la escala (escala Vernier) que se usa hasta la actualidad (Figura 1).

Algunos instrumentos basados en esta técnica usan hasta 3 escalas de forma conjunta para realizar mediciones tan pequeñas como  $1\ \mu\text{m}$  (un micrómetro, es decir, una milésima parte de un milímetro) por lo que no se tardó en explorar la posibilidad de usar dicha técnica en otras áreas de la ciencia y la ingeniería.



**Figura 1.** Ilustración de un Calibrador Vernier en el cual se muestran una parte fija en la que está grabada la escala principal, y una parte móvil, el nonio, que tiene la escala secundaria que permite hacer mediciones muy pequeñas.

Una de las áreas científicas que se vio beneficiada fue la óptica, específicamente los sensores hechos con fibra óptica. La **fibra óptica** es lo que se encuentra en el interior del delgado cable con el que llega el internet a nuestra casa. Está hecha de vidrio, un vidrio muy puro llamado sílice. El que esté hecho de este material le da muchas ventajas para poder guiar luz, por eso el internet de fibra óptica es tan rápido.



Sin embargo, cuando se trata de hacer sensores, especialmente sensores para medir temperatura, estos son poco sensibles a variaciones pequeñas, es decir que son muy malos midiendo temperatura ambiente, por lo que se buscan nuevas formas para mejorar su sensibilidad. Una de esas formas que encontró utilidad fue usar la escala Vernier. Cuando esta técnica de medición se utiliza en señales (como las señales de luz que viajan en la fibra óptica) se le llama efecto Vernier a veces también llamado el principio de Vernier.

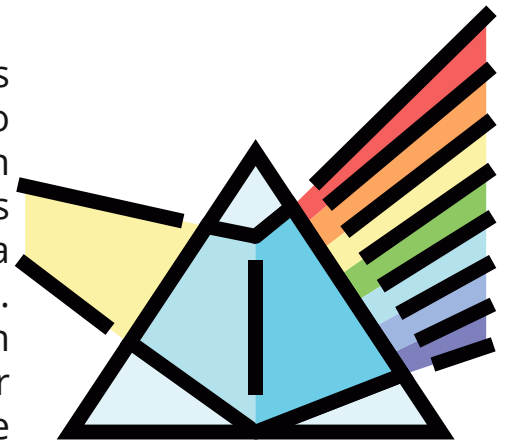




## *En la actualidad*

En el año de 1988, es decir ya en la época moderna, Paul Urquhart investigaba formas para mejorar los láseres de fibra óptica. Observó que, si juntaba dos anillos casi idénticos hechos de fibra óptica era posible observar el efecto Vernier y además era posible usarlo para mejorar la señal a la salida del arreglo experimental.

Con el tiempo han aparecido nuevos usos y muy variadas modificaciones al efecto Vernier, mismos que no tardaron en aplicarse al campo de la óptica, los cuales eventualmente llevaron a que naciera una técnica llamada Peine de frecuencias óptica. Esta técnica hizo merecedores de ganar un Premio Nobel de Física a John Hall y Theodor Hänsch en el año 2005. En la actualidad sigue siendo una técnica muy utilizada en la espectroscopia Vernier.



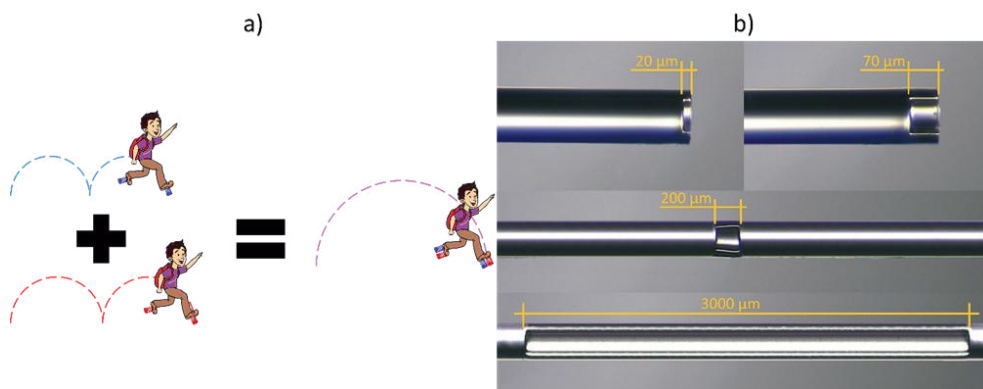
El continuo desarrollo científico y tecnológico en el área de la óptica, relacionado particularmente con las fibras ópticas, sumado a los múltiples desafíos que conlleva su implementación, dio como resultado avances en el campo de los sensores basados en fibras ópticas. La constante necesidad y demanda por lograr construir nuevas estructuras con sensibilidades más altas que las ya existentes crece día con día. Esto ha motivado a diversos grupos de investigación para ser los primeros en encontrar esas mejoras tan solicitadas. El efecto Vernier tiene su propia versión en los sensores de fibra óptica y ha demostrado ser una solución eficiente para cubrir estas necesidades. Durante los últimos 5 años, el uso de esta técnica ha sido un tema muy recurrente en la comunidad científica.





Se tiene registro de que la primera aplicación de esta técnica fue alrededor del año 2012, pero no fue hasta aproximadamente 2 años después que las propiedades y características del efecto Vernier óptico fueron establecidas. Actualmente, el efecto Vernier óptico se utiliza en fibras ópticas para medir una gran cantidad de parámetros como temperatura, índice de refracción, presión, deformación, humedad, flexión, entre otros.

Recientemente, en el año 2021, nuestro grupo de investigación desarrolló un sensor de temperatura que aprovechaba el efecto Vernier para incrementar 67 veces la respuesta normal de un sensor de fibra óptica, es decir que es capaz de medir milésimas de grado. **¿Pero cómo fue posible lograr esto?** Para entender cómo funciona este tipo de dispositivos es necesario saber que al momento de que se hace pasar luz, como la infrarroja, a través del sensor, se producirá una señal periódica a la salida similar a una serie de arcos (Figura 2), cuando dos de estas señales se combinan se produce una nueva señal que envuelve a las dos señales originales por eso se le llama envolvente.

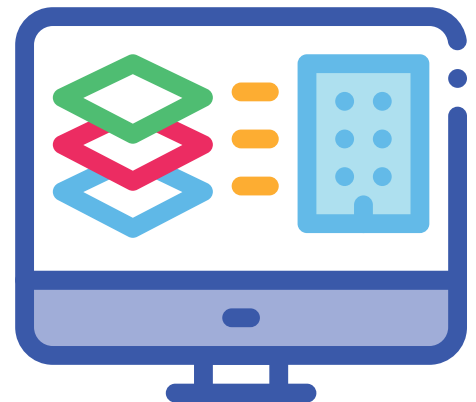


**Figura 2.** Para entender mejor el efecto Vernier podríamos hacer la analogía de utilizar resortes en los pies para saltar, al usar resortes de un cierto grosor podríamos alcanzar cierta distancia, cuando usáramos resortes un poco más gruesos podríamos llegar también un poco más lejos, pero la distancia más larga se lograría al combinar ambos resortes. En la figura b) se aprecian diversos dispositivos fabricados en fibra con tamaños de 20 μm y 70 μm, mientras que los segundos presentan tamaños de 200 μm y 3000 μm.

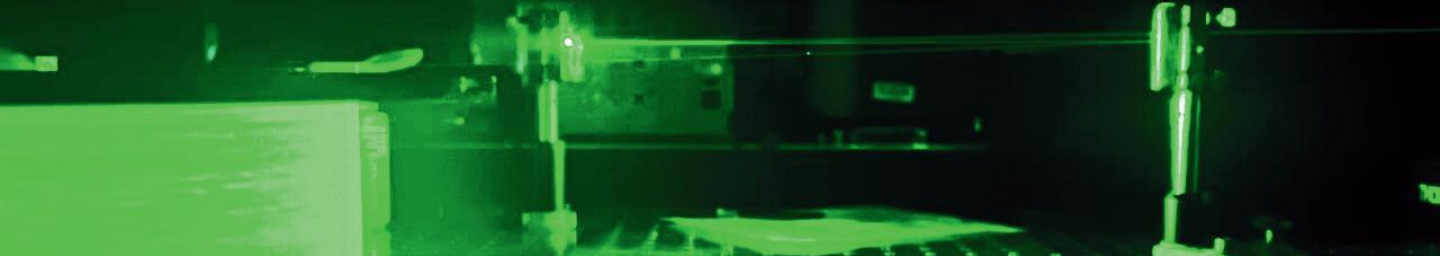


Esta envolvente tendrá una respuesta a la variable a medir mucho mejor que cualquiera de los dos sensores por individual. Aquí es donde el efecto Vernier entra en juego, al igual que en los calibradores Vernier, que usan dos escalas diferentes para mejorar la resolución al momento de medir, cuando dos señales muy similares se combinan la sensibilidad del dispositivo original se magnifica (multiplica). Entre más parecidas sean estas señales más veces se magnificará esta sensibilidad. Durante el desarrollo de estos experimentos nuestro equipo de investigación encontró que si la diferencia entre las señales es del 1% la sensibilidad se amplificará 101 veces.

Es de importancia señalar, que antes de fabricar cualquiera de los sensores se debe estimar que tan sensibles serán, por lo que se realizan simulaciones por computadora que permiten predecir de forma muy precisa el comportamiento de los dispositivos mucho antes de hacerlos.



Estas simulaciones otorgan información de cómo es que la luz viaja por dentro de las fibras que se van a utilizar, y permite seleccionar los tamaños a los que se cortarán las fibras posteriormente. La diferencia entre los resultados experimentales y las simulaciones solo discrepa a lo máximo un 2.5%, es decir, la diferencia entre la realidad y el análisis hecho por computadora es muy pequeña. Las simulaciones también nos dan información de cómo deben realizarse las uniones de las fibras que fueron cortadas, de modo que se pueda ajustar el método de fabricación y con esto tener la menor cantidad de errores. Estos errores, sobre todo los relacionados con el tamaño del sensor y los de las uniones entre las fibras son críticos, por lo que un control muy preciso del método de fabricación es necesario.

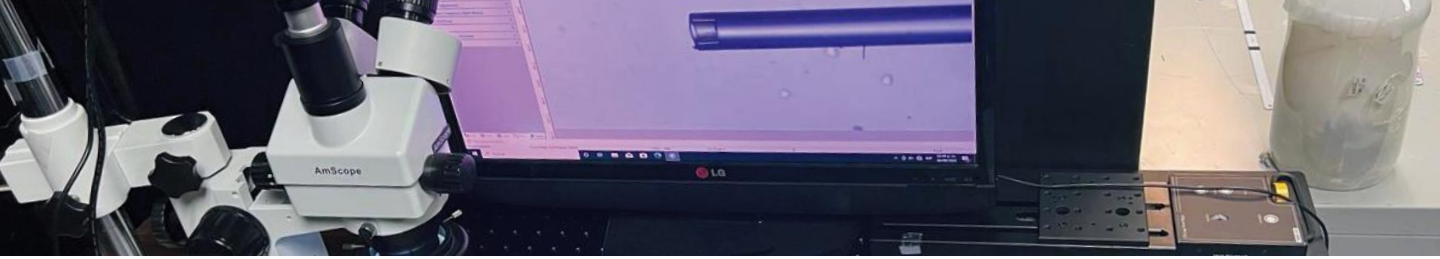


Al momento de fabricar estos dispositivos una diferencia pequeña entre ellos puede llevar a cambios enormes en la sensibilidad. Por lo que es necesario un sistema de fabricación robusto, que permita replicar dispositivos con la menor variación posible. Para poder hacer esto se requirieron de dispositivos precisos para medir las fibras ópticas y cortarlas. Algunos de los elementos necesarios para esto fueron un microscopio, el cual permitía alinear las fibras ópticas a su posición correcta antes de cortar las fibras, una cortadora con una precisión de corte de menos de  $3^\circ$  de inclinación y monturas de movimiento micrométricas, con las que es posible moverse distancias de 0.001 mm. Todo esto solo para poder fabricar los sensores con la mayor repetibilidad y precisión posible.

Los tamaños que se investigaron iban desde los 0.3 mm hasta los 3 mm de longitud, mientras que el error de fabricación promedio para todos esos tamaños usando este método de fabricación fue menor al 4%. Pero en particular, debido a que se deseaba obtener la mayor magnificación de señal posible que pudiera ser medida con los instrumentos del laboratorio, se seleccionó el sensor de 3 mm, pues fue el que presentó el menor error de todos solo un 1.569%.

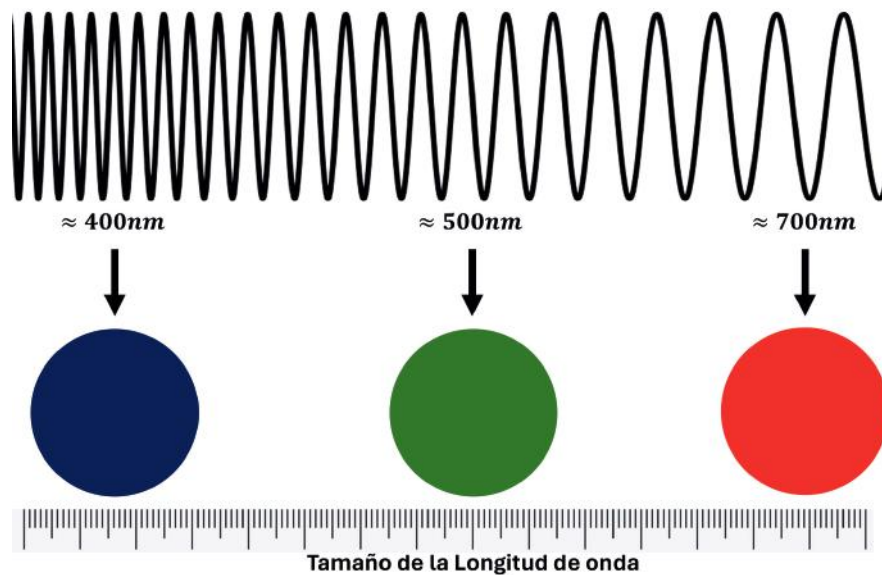
Es importante mencionar que de poderse fabricar sensores con menor error de fabricación no sería posible ver sus señales, pues excederían la capacidad de los instrumentos de nuestro laboratorio para poder medirlos. De modo que fue este el que se seleccionó para fabricar los sensores que se usarían para lograr el efecto Vernier, los cuales se desea que tengan una diferencia de 1.5%.





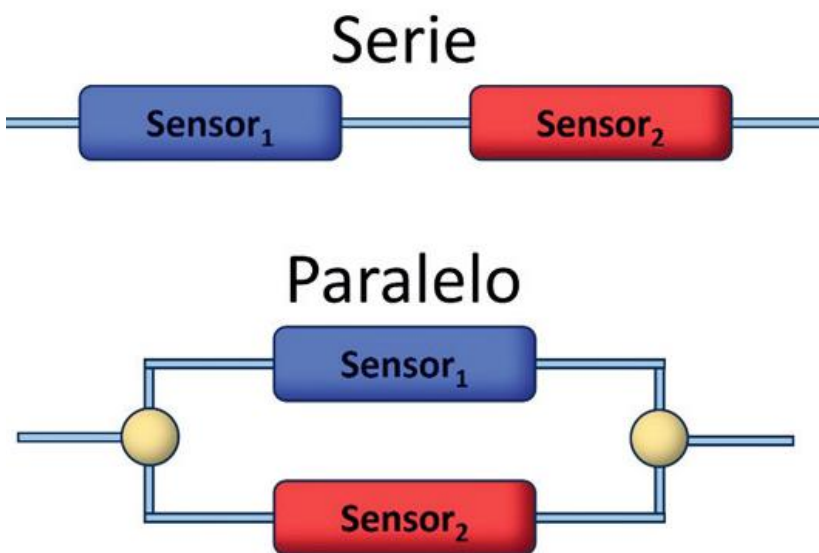
## *Longitud de onda*

Cuando hablamos de la luz (un tipo de radiación electromagnética) un concepto recurrente es la longitud de onda. La longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos (crestas o valles) en una onda electromagnética. En el caso de la luz visible, la longitud de onda determina el color percibido y estas longitudes de onda van desde los 400 nm para colores como el violeta y cerca de los 700 nm para colores como el rojo. La luz invisible como la ultravioleta y la infrarroja tienen longitudes de onda inferiores a los 400 nm y superiores a los 700 nm respectivamente. La relación entre la longitud de onda y el color es fundamental para entender que cuando se usan sensores que miden con luz usualmente se miden en unidades de distancia como los micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), los nanómetros (nm) y los picómetros (pm).





Debido a que este tipo de dispositivos están hechos con sílice los cambios de temperatura les afectan muy poco, lo cual se traduce en una mala sensibilidad a esta variable física. Para ponernos en contexto, un dispositivo de esta clase, usando solamente sílice, tendría una respuesta a la temperatura de 20 a 30 pm/°C, es decir, cuando elevas en 1 °C la temperatura de estos sensores, la señal se moverá entre 0.000000000002 a 0.000000000003 metros. Para obtener las dos señales se deben usar dos sensores muy similares en sus características. Estos dispositivos se conectarán en serie o en paralelo (Figura 3) permitiendo que las señales se combinen. En el caso del sensor hecho por nosotros en el Laboratorio de Física Aplicada y Tecnologías Avanzadas de la Universidad de Guanajuato, la diferencia entre los sensores era de solo 1.54%, lo que permitía una magnificación de la sensibilidad de los dispositivos de un poco más de 67 veces. Los sensores de forma individual tenían una respuesta de 29.3 pm/°C, muy cercana al límite teórico para esta clase de dispositivos. Al combinarlos y obtener el efecto Vernier se logró obtener una sensibilidad de 1.964 nm/°C. Dando como resultado una amplificación exacta de la sensibilidad de 67.04 veces.



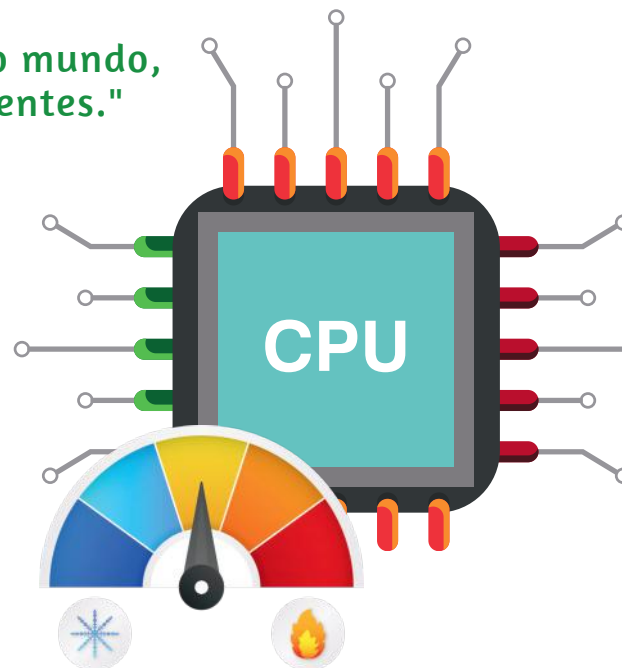
**Figura 3.** Existen dos formas de conectar los sensores de fibra para observar el efecto Vernier, en serie (cascada), y en paralelo.



Este sensor en particular tiene el potencial de ser usado en diversas áreas científicas, tecnológicas e industriales como en el cultivo celular, lo cual permitiría controlar con precisión la temperatura en la cual tejidos y órganos humanos artificiales son cultivados para ser trasplantados a personas que lo necesitan. También tiene uso en el cómputo de frontera, como el CPU presentado en el Hot Chips 2023 donde Intel muestra su primer chip con puertos de alta velocidad que se comunican por medio de luz. Un sensor de este tipo permitiría medir la temperatura interna del CPU de forma precisa usando esta tecnología fotónica. No olvidemos sus posibles aplicaciones en la industria de la construcción, donde se usan sensores de fibra óptica para monitorear la integridad estructural y la temperatura de construcciones como puentes y edificios

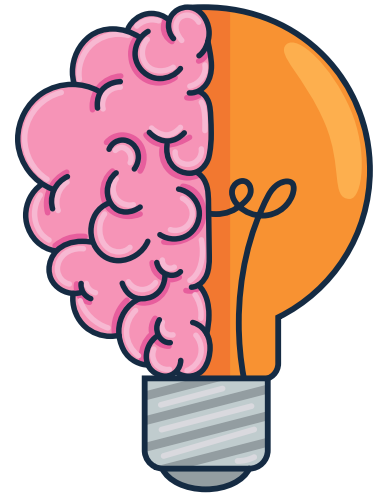
**"Medir no solo construye nuestro mundo, también construye nuestras mentes."**

El camino que ha recorrido la humanidad ha sido largo. Medir no es solo parte de nuestro día a día, es parte de nosotros mismos. Usamos nuestro cuerpo como referencia estimando volúmenes, cantidades, distancias y tamaños. No se trata de que todos los días seamos conscientes de las cosas que medimos, sin embargo, a diario medimos o usamos cosas que inherentementerequirieron de una o varias mediciones para existir, como por ejemplo la computadora, el celular o el papel desde donde lees esto. Incluso el tamaño de letra, la intensidad del brillo de la pantalla o el tamaño y grosor del papel tienen intrínsecamente asociada una medición.





Nuestros cerebros entendieron que al comparar dos cosas las estábamos midiendo, y eso estimuló nuestra creatividad para llevarlo a terrenos nunca explorados. Llevamos conceptos físicos tangibles como el que se usa en el calibrador Vernier a terrenos no tan evidentes como la óptica y los sensores de fibras. Medir no solo construye nuestro mundo, también construye nuestras mentes. 🍀

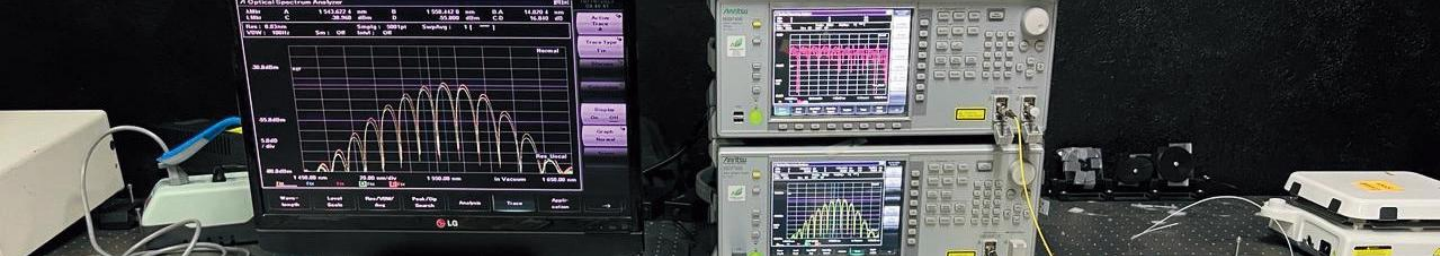


## *Agradecimientos*

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Guanajuato bajo el apoyo CIIC-105/2023.

## *Para Consulta*

- Marrujo-García S, Hernández-Romano I, May-Arrijoja DA, *et al.* 2021. In-line Mach-Zehnder interferometers based on a capillary hollow-core fiber using Vernier effect for a highly sensitive temperature sensor. *Sensors* 21(16): 5471. <https://doi.org/10.3390/s21165471>.
- Gomes AD, Bartelt H, Frazão O. 2021. Optical Vernier effect: recent advances and developments. *Laser & Photonics Reviews* 15(7): 2000588. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000588>.
- Goldstein BR. 1985. Commentary. In *The Astronomy of Levi Ben Gerson (1288–1344)*. Springer 11: 131-197. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8569-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8569-1_3).
- Brahe T, Raeder H. 1946. Tycho Brahe's Description of His Instruments and Scientific Work: As Given in *Astronomiae Instauratae Mechanica (Wandesburgi 1598)*. I Kommission hos E. Munksgaard. <https://books.google.com.mx/books?id=IWrvAAAAMAAJ>.
- Dreyer JLE. Tycho Brahe. 2014. Cambridge University Press. <https://books.google.com.mx/books?id=CdzSAGAAQBAJ>.
- Vincent J. 2023. *Beyond Measure: The Hidden History of Measurement from Cubits to Quantum Constants*. Norton & Company.



Crédito de imágenes en orden de aparición: Brett Sayles (Pexels, P), mesut zengin (Getty Images, GI), JKimsey (pixabay), Vectoressa, sparklestroke, Naris Artyuenyong, iconsy, bluebay2014(GI), Smashing Stocks, siberianart, impaKPro (GI), magann (GI), Tiero, Miguel Guassch, Proxima Studio, Vectorwin, Fernando Cortes, pikepicture, kynny (GI), Vectortradition, Industrial Photograph, Artush, jemastock, Vector-Up, peterschreiber.media (GI), prohee, ivandesign. Las figuras fueron proporcionadas por los autores.

*Diseño de publicación: Yareli Fiburcio*

**Selene Ramos Ortiz**  
Editor Asociado Revista CyN



## Iván Hernández Romano

Investigador por México, asignado al Departamento de Ingeniería Electrónica, DICIS, Universidad de Guanajuato. Doctor en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Actualmente, interesado en desarrollar sensores de fibra óptica usando fibras especiales, tales como las fibras capilares huecas. Con la finalidad de realizar monitoreo preventivo en estructuras civiles o mecánicas.

Contacto: [hromano@ugto.mx](mailto:hromano@ugto.mx)



## Sigifredo Marrujo García

Maestro en Tecnología Avanzada del Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, IPN, Ciudad de México, México, en 2015 y recibió el grado de Doctor en Ingeniería por parte de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México en el año 2023. Sus intereses de investigación actuales incluyen sensores de fibra óptica y sus aplicaciones en el área de la ingeniería.

Contacto: [s.marrujogarcia@ugto.mx](mailto:s.marrujogarcia@ugto.mx)



## Laura Giselle Martínez Ramírez

Licenciada en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica y actualmente estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica, DICIS, Universidad de Guanajuato. Está interesada en la implementación de sensores de fibra óptica para la detección de variables físicas, así como la elaboración de láseres de fibra óptica conmutables y sintonizables.

Contacto: [lg.martinezzramirez@ugto.mx](mailto:lg.martinezzramirez@ugto.mx)



## Miguel Cipriano Guzmán Cano

Licenciado en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica y actualmente estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica, DICIS, Universidad de Guanajuato. Está interesado en el desarrollo de sensores de fibra óptica para la detección de curvatura y torsión. Así como en el procesamiento de las señales que generan, para obtener más información sobre las variables a medir.

Contacto: [mc.guzmancano@ugto.mx](mailto:mc.guzmancano@ugto.mx)