













Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] para sensado térmico

Design and Characterization of a Raman Fiber Laser with FBG at 1119 nm: Comparative Study of MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km], and 1060XP [1 km] Fibers for Thermal Sensing

Coba-Ramos, Jesus Alberto ^a, De la Cruz-May, Lelio * ^b, Benavides, Olena ^c y Meza-Cruz, Onésimo ^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  MVY-7025-2025 •  0009-0005-8071-7021 •  392386

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  D-3896-2011 •  0000-0003-3918-0582 •  75160

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  Q-3771-2019 •  0000-0002-8124-0326 •  339830

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  LTD-0198-2024 •  0000-0002-0875-6852 •  488085

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.1.18>

Área: Física-Matemáticas y Ciencias de la Tierra

Campo: Física

Disciplina: Óptica

Subdisciplina: Láseres

Key Handbooks

En este trabajo se presenta el diseño y la caracterización de un láser Raman de fibra óptica con rejilla de Bragg [FBG] a 1119 nm. El objetivo es evaluar cuatro configuraciones experimentales empleando fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km], analizando la influencia de la longitud y del área efectiva de la fibra en la eficiencia Raman, la generación del primer Stokes y la estabilidad espectral. Es importante destacar que se alcanzaron sensibilidades térmicas entre 12.7 y 14.32 pm/°C y una histéresis reducida de 0.14 a 0.23 nm, confirmando la confiabilidad del sistema como sensor térmico. Los resultados posicionan a este diseño como una alternativa robusta, compacta y económica frente a los sensores convencionales a 1550 nm, con gran potencial de aplicación en telecomunicaciones, industria y biomedicina. Los autores por orden en este capítulo de libro cuentan con la siguiente cantidad de citas 1, 2, 2 y 0. El autor Coba-Ramos cuenta con beca CONAHCYT y el resto de los autores cuentan con perfil deseable PRODEP y pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Todos los autores son procedentes de la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más empleadas son: Láser Raman de Fibra Óptica, Rejilla de Bragg [FBG] y Sensor.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Coba-Ramos, Jesus Alberto, De la Cruz-May, Lelio, Benavides, Olena y Meza-Cruz, Onésimo. 2025. Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] para sensado térmico. 1-18. ECORFAN.

* ✉ [\[ldelacruz@pampano.unacar.mx\]](mailto:ldelacruz@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]


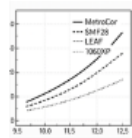


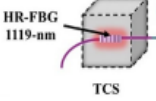
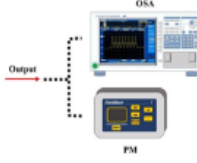
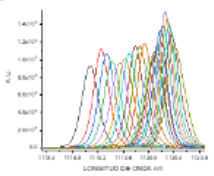
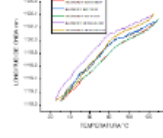
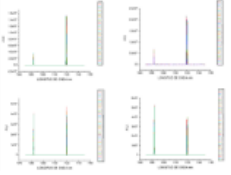
Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

This work presents the design and characterization of a Raman fiber laser with a Fiber Bragg Grating [FBG] at 1119 nm, aimed at high-precision thermal sensing. Four experimental configurations using MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km], and 1060XP [1 km] fibers were evaluated, analyzing the influence of fiber length and effective area on Raman efficiency and spectral stability. Results demonstrated thermal sensitivities ranging from 12.7 to 14.32 pm/°C and a reduced hysteresis of 0.14–0.23 nm, confirming the reliability of the sensor during heating and cooling cycles. The performance achieved surpasses that of conventional sensors operating at 1550 nm, consolidating this proposal as a robust, compact, and cost-effective alternative with strong potential for remote monitoring, telecommunications, industry, and biomedical applications where temperature measurement accuracy is critical.

“Design and Characterization of a Raman Fiber Laser with FBG at 1119 nm: Comparative Study of MetroCor (4 km), SMF28 (5 km), LEAF (4.7 km), and 1060XP (1 km) Fibers for Temperature Sensing”


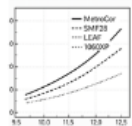


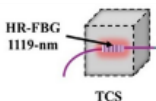
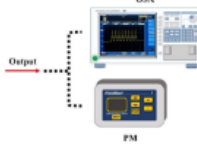
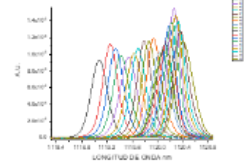
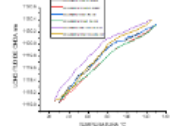
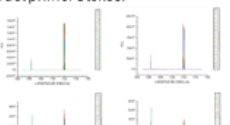
Objective	Methodology	Contribution
<p>To design and characterize a Raman fiber laser with FBG at 1119 nm for temperature sensing</p>  <p>To compare the results of different fibers (MetroCor, SMF28, LEAF, 1060XP) in terms of thermal sensitivity and system stability</p>  <p>To validate the feasibility of this technology as an alternative to conventional optical sensors at 1550 nm</p> 	<p>Four experimental setups were designed and characterized</p> <ul style="list-style-type: none"> 4 km MetroCor + 4.7 km LEAF 4 km MetroCor + 1 km 1060XP 5 km SMF28 + 4.7 km LEAF 5 km SMF28 + 1 km 1060XP  <p>The FBG (1119 nm) was subjected to temperature variations (35–160°C) in a controlled oven.</p>  <p>Spectra and powers were analyzed using an OSA and an optical power meter.</p> 	<p>Thermal sensitivities between 12.7 and 14.32 pm/°C were achieved</p>  <p>A reduced hysteresis of 0.24 nm was achieved, confirming the stability of the system</p>  <p>The relationship between fibers with different effective areas improves the efficiency of the first Stokes</p>  <p>This work provides a new compact, precise, and robust photonic alternative for industrial, biomedical, and remote monitoring applications.</p>

Raman Fiber Laser, Fiber Bragg Grating [FBG], Sensor

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y la caracterización de un láser Raman de fibra óptica con rejilla de Bragg [FBG] a 1119 nm, orientado a sensores térmicos de alta precisión. Se evaluaron cuatro configuraciones experimentales con fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km], analizando la influencia de la longitud y área efectiva de la fibra en la eficiencia Raman y en la estabilidad espectral del sistema. Los resultados muestran sensibilidades térmicas entre 12.7 y 14.32 pm/°C y una histéresis reducida de 0.14 a 0.23 nm, confirmando la confiabilidad del sensor en ciclos de calentamiento y enfriamiento. El desempeño alcanzado supera a los sensores convencionales a 1550 nm, consolidando esta propuesta como una alternativa robusta, compacta y económica, con potencial de aplicación en monitoreo remoto, telecomunicaciones, industria y biomedicina, donde la exactitud en la medición de temperatura resulta crítica.

“Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor (4 km), SMF28 (5 km), LEAF (4.7 km) y 1060XP (1 km) para sensado térmico”

Objetivo	Metodología	Contribución
<p>Diseñar y caracterizar un láser Raman de fibra óptica con FBG a 1119 nm para sensado de temperatura.</p>  <p>Comparar los resultados de diferentes fibras (MetroCor, SMF28, LEAF, 1060XP) en la sensibilidad térmica y estabilidad del sistema.</p>  <p>Validar la viabilidad de esta tecnología como alternativa a sensores ópticos convencionales a 1550 nm.</p> 	<p>Se diseñaron y caracterizaron 4 arreglos experimentales</p> <p>4 km MetroCor + 4.7 km LEAF 4 km MetroCor + 1 km 1060XP 5 km SMF28 + 4.7 km LEAF 5 km SMF28 + 1 km 1060XP</p>  <p>La FBG (1119 nm) fue sometida a variaciones de temperatura (35–160 °C) en un horno de control.</p>  <p>Se analizaron espectros y potencias con un OSA y medidor óptico.</p> 	<p>Se alcanzaron sensibilidades térmicas entre 12.7 y 14.32 pm/°C.</p>  <p>Se logró una histéresis reducida de 0.24 nm, confirmando la estabilidad del sistema.</p>  <p>La relación entre fibras de distinta área efectiva mejora la eficiencia del primer Stokes.</p>  <p>El trabajo aporta una nueva alternativa fotónica compacta, precisa y robusta para aplicaciones industriales, biomédicas y de monitoreo remoto.</p>

Láser Raman de Fibra Óptica, Rejilla de Bragg [FBG], Sensor

Introducción

En los últimos años, los **láseres Raman de fibra óptica** han adquirido gran relevancia dentro de la fotónica por su capacidad de generar emisiones coherentes y ajustables en distintas longitudes de onda. Estas propiedades los hacen altamente atractivos para aplicaciones en **telecomunicaciones, espectroscopía, monitoreo ambiental y sensado remoto**. A diferencia de los sistemas convencionales, este tipo de láseres ofrece beneficios adicionales como su **capacidad, robustez, estabilidad espectral y resistencia a condiciones adversas**, lo cual amplía su rango de aplicación en entornos industriales y científicos [Feng, 2017; Agrawal, 2013; Islam, 2002].

Box 1



Figura 1

Usos de los laser Raman de fibra Óptica

El **Esparcimiento Raman Estimulado [SRS, por sus siglas en inglés]** constituye un fenómeno fundamental en diversas áreas, entre ellas las telecomunicaciones por fibra óptica, el procesado de materiales, las fuentes de bombeo, la espectroscopía y aplicaciones médicas. En el ámbito de las fibras ópticas, la SRS se aprovecha como un mecanismo de ganancia altamente eficiente que permite amplificar o desplazar señales dentro del intervalo espectral de 1000 a 1700 nm [Agrawal, 2013; Islam, 2002; De la Cruz-May et al., 2023].

El efecto Raman se produce cuando un fotón interactúa con una molécula, resultando en dos tipos de dispersión: la dispersión elástica o Rayleigh, en la que el fotón dispersado conserva la misma energía del incidente; y la dispersión inelástica o Raman, en la que el fotón dispersado cambia su frecuencia. Esta última puede subdividirse en dos casos: dispersión Raman-Stokes, cuando el fotón pierde energía al transferirla a la molécula, y dispersión Raman-anti-Stokes, cuando el fotón gana energía desde la molécula [Agrawal, 2013; Islam, 2002; De la Cruz-May et al., 2023].

Box 2

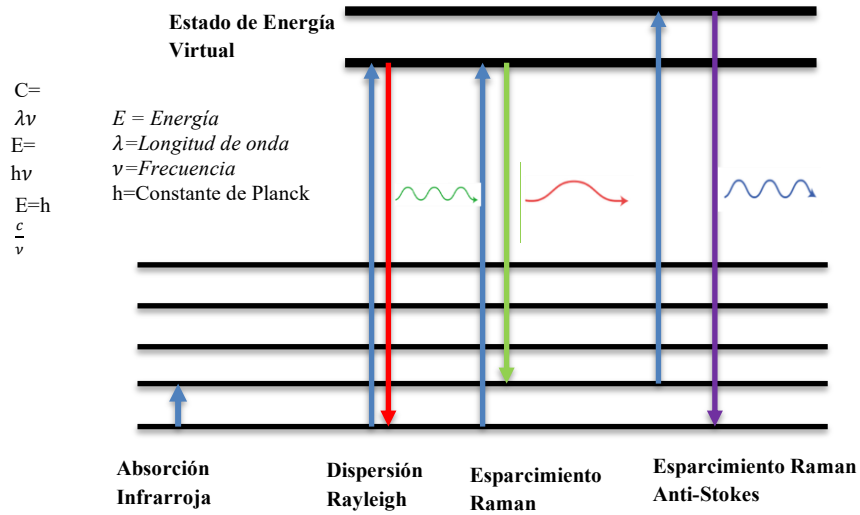


Figura 2
Niveles de energía del fotón en el Esparcimiento Raman

Si un fotón con la frecuencia de Stokes interactúa con una molécula en un estado vibracional virtual, induce a la molécula a decaer a un nivel vibracional de menor energía. Este proceso resulta en la emisión de otro fotón de Stokes, el cual comparte la misma fase y amplitud que el fotón incidente, amplificando así la señal. La repetición de esta interacción a lo largo de la trayectoria del haz de Stokes, y con múltiples moléculas excitadas en el estado virtual, conduce a la amplificación coherente de la luz, fenómeno conocido como Esparcimiento Raman Estimulado [Agrawal, 2013; Islam, 2002; De la Cruz-May et al., 2023].

Box 3

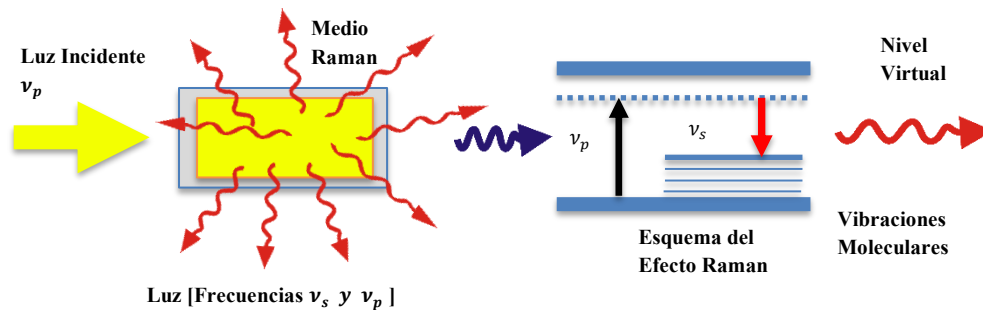


Figura 3
Esparcimiento Raman Estimulado

Ganancia Raman

$$gR = \frac{16A_{eff}}{P_{th}L_{eff}} \tag{1}$$

Potencia de Umbral

$$P_{th} = \frac{16\alpha[\pi w^2]}{gR} \tag{2}$$

Ecuaciones diferenciales acopladas que describen el comportamiento del esparsimiento Raman Estimulado

$$\frac{dP_p^+}{dz} = -\alpha_p P_p^+ - \frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{g_{RP}}{A_{eff}} P_p^+ [P_p^+ + P_p^-] \tag{3}$$

$$\frac{dP_P^+}{dz} = -\alpha_S P_S^+ + \frac{g_{RS}}{A_{eff}} P_S^+ [P_P^+] \quad [4]$$

$$\frac{dP_P^-}{dz} = \alpha_S P_S^- - \frac{g_{RS}}{A_{eff}} P_S^- [P_P^+] \quad [5]$$

En este caso, P_P^+ , P_S^+ y P_S^- corresponden a las potencias de bombeo y de Stokes, respectivamente, donde los superíndices $+$ y $-$ indican la propagación en sentido directo e inverso. Los parámetros α_P y α_S representan las atenuaciones de la fibra para la onda de bombeo y la onda de Stokes, respectivamente. Por su parte, g_{RP} y g_{RS} designan los coeficientes de ganancia Raman asociados al bombeo y a la señal Stokes. La variable A se refiere al área efectiva de Stokes en la fibra, mientras que z indica la posición a lo largo del eje de la fibra óptica [Islam, 2004; Agrawal, 2010; Pages-Pacheco et al., 2023].

Un componente clave en el funcionamiento de los láseres Raman es la fibra óptica, que presenta una ganancia Raman intrínseca. Para aplicaciones avanzadas, se requieren fibras con mayor ganancia Raman y características específicas como un área efectiva del modo optimizada, la cual depende del perfil del índice de refracción de la fibra. Esta área efectiva influye directamente en la intensidad de la radiación de bombeo necesaria para una potencia dada al igual que su Longitud efectiva tal como se muestra en las ecuaciones [Islam, 2004; Agrawal, 2010; Pages-Pacheco et al., 2023].

En el mundo actual, medir con precisión la temperatura en diferentes entornos industriales, científicos e incluso biomédicos se ha vuelto fundamental. Para lograrlo, la tecnología ha ido más allá de los métodos tradicionales, abriendo paso a soluciones basadas en la luz y la fibra óptica. Una de estas innovaciones es el uso de rejillas de Bragg en fibra óptica [FBG, por sus siglas en inglés], dispositivos que aprovechan las propiedades ópticas de la luz para detectar cambios sutiles en el ambiente [Yin, Ruffin & Yu, 2008; Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021].

Box 4

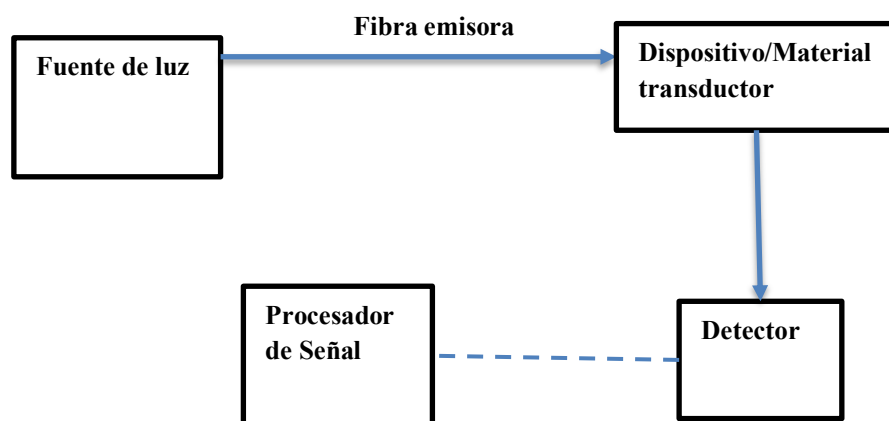


Figura 4

Diagrama de bloques de los componentes de un sensor óptico básico.

La fibra óptica, conocida por su capacidad de transmitir datos a gran velocidad, también puede actuar como un sensor sensible y confiable. Al integrar rejillas de Bragg en estas fibras, es posible obtener mediciones de temperatura extremadamente precisas. La razón radica en que la estructura interna de la rejilla cambia cuando la temperatura varía, modificando así la longitud de onda de la luz reflejada [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021; Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014]. Este efecto permite utilizar la fibra como un termómetro de alta tecnología.

En este sentido para la investigación realizada la **rejilla de Bragg en fibra [FBG]** es uno de los elementos clave en este sistema para detectar cambios de temperatura, ya que esta actúa como reflector y sensor al mismo tiempo. El principio de funcionamiento se basa en la variación del periodo de la rejilla y del índice de refracción efectivo, lo que ocasiona un corrimiento en la longitud de onda reflejada. Esta característica convierte a las FBG en sensores ópticos de alta precisión, capaces de detectar cambios de temperatura y tensión con gran exactitud. Entre sus ventajas se encuentran la **inmunidad a interferencias electromagnéticas, resistencia a radiaciones y facilidad de integración en redes ópticas**, lo que representa un avance frente a tecnologías tradicionales, [Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014; Maini, 2013].

Además, al combinar esta tecnología con los láseres Raman de fibra óptica, se puede obtener una fuente de luz más estable y ajustable, lo que mejora la precisión de la medición. Los láseres Raman, basados en un fenómeno conocido como esparcimiento Raman estimulado, interactúan con las moléculas de la fibra para amplificar señales luminosas específicas [Feng, 2017; Yin, Ruffin & Yu, 2008]. Esta interacción genera lo que se conoce como señal Stokes, que se puede aprovechar en conjunto con la FBG para detectar cambios de temperatura de forma remota y segura [Feng, 2017; Maini, 2013; Kashyap, 2009].

A diferencia de los sistemas convencionales que utilizan rejillas de Bragg que operan a longitudes de onda de 1550 nm, en este trabajo se explora una nueva alternativa a 1119 nm, lo que no solo amplía las posibilidades de aplicación, sino que también mejora la estabilidad y sensibilidad de los sensores ópticos [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021]. Gracias a su diseño compacto, resistencia a vibraciones y alta precisión, estos sistemas prometen revolucionar la forma en que se mide la temperatura en sectores donde la exactitud es crucial.

El interés del estudio de los sensores ópticos es que tiene muchas ventajas en comparación con los sensores convencionales, como son los siguientes: Inmunidad a las interferencias electromagnéticas, no es muy pesado, tamaño pequeño, no conducen corriente, resistentes a radiaciones ionizantes, no necesitan recalibración, pueden colocarse en lugares remotos/inaccesibles, alta sensibilidad, gran ancho de banda, facilidad para ser utilizados dentro de las redes de comunicaciones ópticas, posibilidad de multiplexación [Yin, Ruffin & Yu, 2008; Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021; Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014].

Teoría

Las rejillas de Bragg en fibra óptica [FBG] son herramientas especialmente valiosas para el monitoreo de temperatura, debido a su alta sensibilidad. La temperatura influye directamente en el espaciado entre los períodos que conforman la FBG, alterando su estructura interna. Esta modificación en el período de la rejilla provoca un cambio proporcional en la longitud de onda de Bragg reflejada. [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021; Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014; Maini, 2013]. Esta relación directa entre la temperatura y la longitud de onda de Bragg es lo que permite utilizar las FBG como sensores de temperatura de alta precisión. La longitud de onda de la luz reflejada o longitud de onda de Bragg está dada por:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad [6]$$

donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, Λ es el periodo de red de Bragg, n_{eff} es el índice de refracción efectiva.

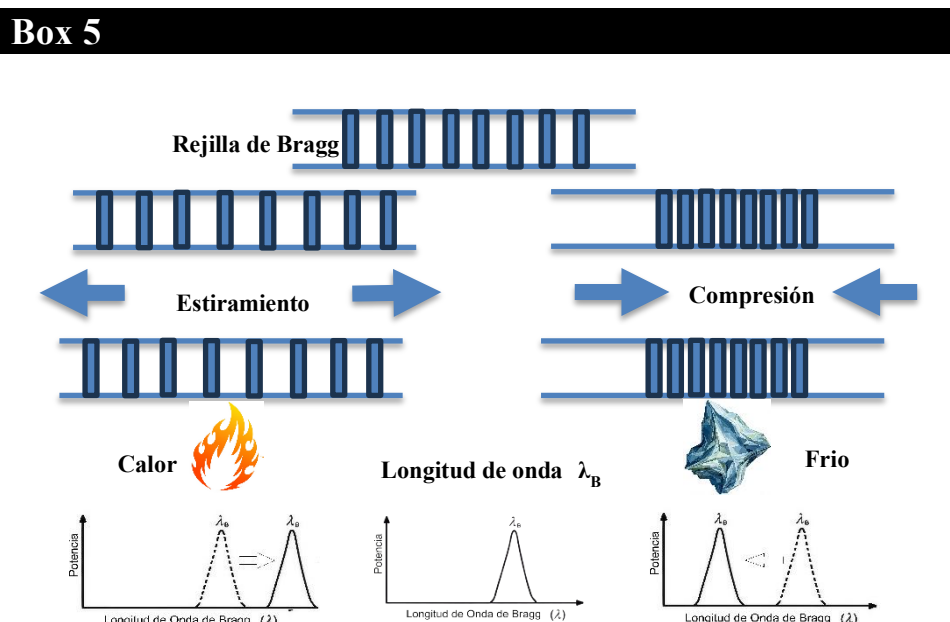


Figura 5
Longitud de Onda de Bragg

La respuesta al corrimiento en longitud de onda de Bragg debido a cambios de temperatura es llamada sensibilidad y está dada por:

$$S = \Delta\lambda_B / \Delta T \quad [7]$$

Donde $\Delta\lambda_B$ es la diferencia de longitud de onda de Bragg inducida por el aumento de temperatura y ΔT es el cambio de temperatura [Kashyap, 2009].

Por otra parte, el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg con la temperatura y la tensión viene dado por la expresión:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \{ [1 - \rho_e] \Delta\varepsilon + [\alpha_\Lambda + \alpha_n] \Delta T \} \quad [8]$$

donde: ρ_e : coeficiente de tensión, $\Delta\varepsilon$: incremento/disminución de tensión aplicada, α_Λ coeficiente de expansión térmica, α_n coeficiente de expansión termo-óptica, ΔT incremento/disminución de temperatura [Maini, 2013; Kashyap, 2009].

EL desplazamiento de la longitud de onda de Bragg frente a la temperatura se expresa:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \lambda_B [\alpha + \xi] \quad [9]$$

α = coeficiente de expansión térmica de la fibra

ξ = coeficiente termo-óptico de la sílice

Box 6

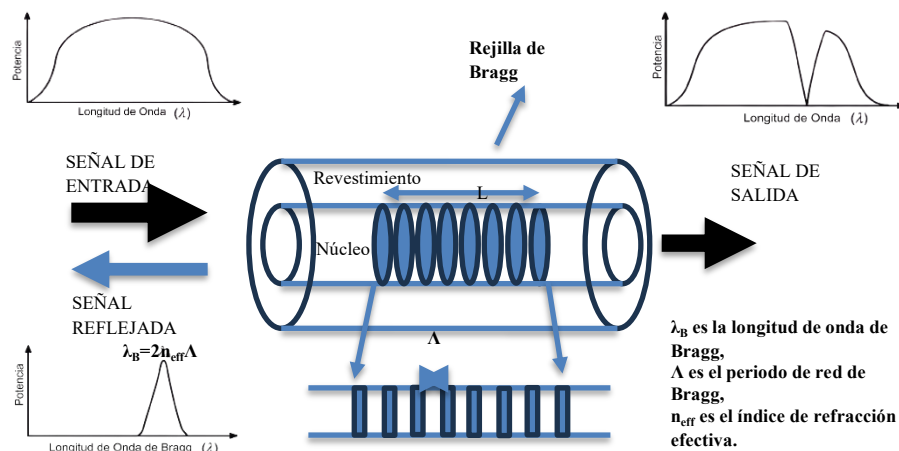


Figura 6

Rejilla de Bragg

El valor agregado de esta investigación se centra en la **optimización de un láser Raman de fibra óptica a 1119 nm**, acoplado con FBG, como alternativa a los sistemas que operan en la región de 1550 nm. Esta longitud de onda menos explorada ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de sensores ópticos más estables, compactos y sensibles.

La **hipótesis central** plantea que la combinación de fibras con diferentes longitudes y áreas efectivas —como MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] y que influyen de manera determinante en la eficiencia Raman, en la generación del primer Stokes y en la precisión del sensado térmico.

Con este enfoque, el trabajo busca demostrar cómo la integración de láseres Raman y FBG puede consolidarse como una solución innovadora para el desarrollo de **sensores ópticos de temperatura**, contribuyendo a la generación de nuevo conocimiento y al fortalecimiento de las tecnologías fotónicas.

Metodología

En esta configuración se emplea como fuente de bombeo un láser de fibra dopado con iterbio [Yb], operando en modo continuo, modelo YLR-10-1064-LP de la empresa IPG Photonics. Este dispositivo proporciona una potencia máxima de salida de 10 W a una longitud de onda central de 1064 nm. Su emisión está linealmente polarizada en el modo fundamental TME00, con un ancho espectral de 0.5 nm. La señal del láser se introduce en el puerto 1 de un multiplexor por división de longitud de onda [WDM] el cual está diseñado para soportar hasta 5 W de potencia óptica a 1064 nm. A través del puerto 2 del WDM, se transmite aproximadamente el 42% de la potencia óptica a esa longitud de onda, mientras que alrededor del 15% se dirige por el puerto 3 y cerca del 4.6% por el puerto 4. El resto, aproximadamente un 38.4%, corresponde a pérdidas por inserción del dispositivo.

En el puerto 2 se empalmarán en [S3] conforme a los dos arreglos propuestos dos tipos de fibra con las siguientes características: un tramo de 4 km de fibra óptica del tipo Corning MetroCor, la cual presenta un área efectiva cercana a $40 \mu\text{m}^2$ y posteriormente se realizó un segundo arreglo empalmando 5 Km de fibra SMF28 con un área efectiva de $90 \mu\text{m}^2$ [medios de ganancia en el arreglo Raman] Tabla 1. Y como medios de operación [transmisión] en el puerto 4, S2 se empalmaron 4.7 km de fibra LEAF, que después se quitó y se sustituyó por 1 km de fibra 1060XP, ambas se empalmaron en S4, junto con una rejilla de Bragg de fibra óptica [FBG] con las siguientes características: longitud de onda central de 1119.768 nm, ancho a media altura [FWHM] de 0.120 nm, sin recubrimiento, reflectividad del 99%, sensibilidad tipo I y periodo uniforme. La FBG se alojó dentro de un horno para control preciso de la temperatura, proporcionando retroalimentación puntual; Las pérdidas por empalme en toda la configuración fueron del orden de 0.01 dB.

Box 7

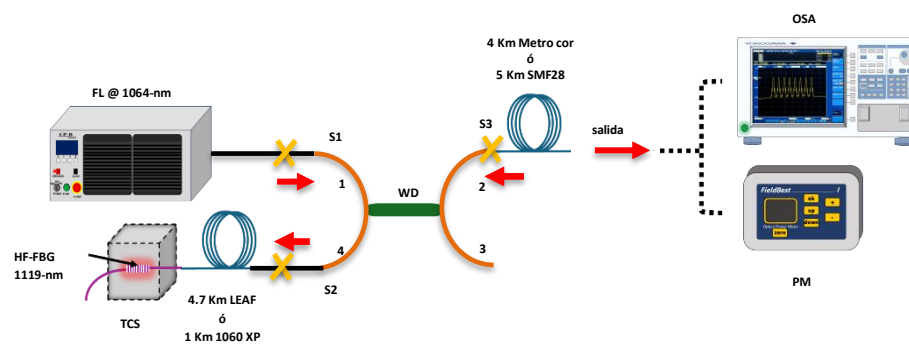


Figura 7

Diseño Experimental con las fibras Metrocor y SMF28 como medios de ganancia Raman y fibras LEAF y 1060XP como medio de operación [transmisión]

Box 8

Table 1

Descripción de los arreglos experimentales

Arreglo	Descripcion	Uso de la fibra optica
1	4 Km Metrocor -4.7 Km LEAF -Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 4 Km de fibra Metrocor , Medio de Operación[transmision]: 4.7 Km de fibra LEAF
2	4 Km Metrocor -1 Km 1060XP -Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 4 Km de fibra Metrocor , Medio de Operación[transmision]: 1 Km de fibra 1060XP
3	5 Km SMF 28 -4.7 Km LEAF - Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 5 Km de fibra SMF 28, Medio de Operación[transmision]: 4.7 Km de fibra LEAF]
4	5 Km SMF 28 -1 Km 1060 XP -Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 5 Km de fibra SMF 28 , Medio de Operación[transmision]: 1 Km de fibra 1060 XP

Cuando se bombea una potencia de 4.3 W en el puerto 2 del WDM, tanto la fibra óptica Corning MetroCor de 4 km y la SMF 28 [en los dos arreglos] se inicia de forma inmediata, el proceso de dispersión Raman estimulada. En esta parte del experimento, se generan señales Stokes [esparcimiento Raman espontaneo y esparcimiento Raman estimulado], con una emisión centrada alrededor de los 1121 nm, en concordancia con lo reportado previamente [Coba-Ramos et al., 2025]

Simultáneamente, cerca del 4.6% de la potencia de bombeo se acopla por el puerto 4 y es guiada a través de los 4.7 km de fibra LEAF y en 1 Km de fibra 1060 XP [según el arreglo] hasta llegar a la FBG, que está diseñada para reflejar señales a 1119 nm. Adicionalmente, en el extremo de salida de la FBG ocurre una reflexión parcial [$\sim 4\%$] de la potencia de bombeo debido al efecto Fresnel en la interfaz aire-vidrio. Esta porción de luz reflejada atraviesa nuevamente la FBG, y recorre en sentido inverso los 4.7 km de fibra LEAF ó 1 Km de fibra 1060XP [según el arreglo] y regresa al puerto 2 del WDM, al tramo de 4 km de fibra MetroCor ó 5 Km de fibra SMF28 de acuerdo con el arreglo experimental.

Cabe mencionar que la señal reflejada, que coincide con las longitudes de onda de operación de la FBG, se combina con el bombeo que se propaga en sentido directo dentro del medio de ganancia Raman. Este proceso contribuye a estimular las transiciones de moléculas excitadas en los niveles virtuales del vidrio, generando fotones coherentes con las características de la FBG, lo que da lugar a la amplificación Raman o emisión Stokes.

Para el análisis espectral de la señal generada, se conectó un analizador de espectro óptico [OSA] al extremo de salida de la fibra MetroCor de 4 km ó a los 5 Km de fibra SMF28 [según sea el caso]. Asimismo, se empleó un medidor de potencia óptica [PM], insensible a la longitud de onda, con el fin de registrar la potencia entregada. Cabe destacar que se utilizó una cuña óptica para atenuar la potencia del láser antes de ingresar al OSA. No obstante, posibles imperfecciones en el recubrimiento de la cuña o variaciones en la dirección del haz láser pueden producir fluctuaciones en la potencia transmitida, lo cual se refleja en cambios observables durante el monitoreo de salida del sistema. La variación de temperatura en este sistema se lleva a cabo mediante un controlador digital REX-C100, el cual se programa para ejecutar los cambios térmicos dentro de un sistema herméticamente sellado, fabricado con concreto refractario TR44 Clase C, que garantiza la estabilidad térmica. El sistema cuenta con resistencias eléctricas capaces de alcanzar temperaturas desde ambiente hasta 700 °C.

Para la caracterización del láser Raman de fibra óptica, se empleó una rejilla de Bragg [FBG] como cavidad resonante, y se realizó un control térmico preciso sobre ella, aumentando y disminuyendo la temperatura desde 35 °C hasta 160 °C y viceversa, variando la temperatura cada 10°C. Durante este proceso, se garantizó que el sistema permaneciera libre de tensiones mecánicas o deformaciones que pudieran comprometer los resultados experimentales. En todas las configuraciones se llevó a cabo el mismo proceso para una evaluación precisa del desplazamiento de la longitud de onda de Bragg, en función de la temperatura aplicada a la FBG.

Box 9

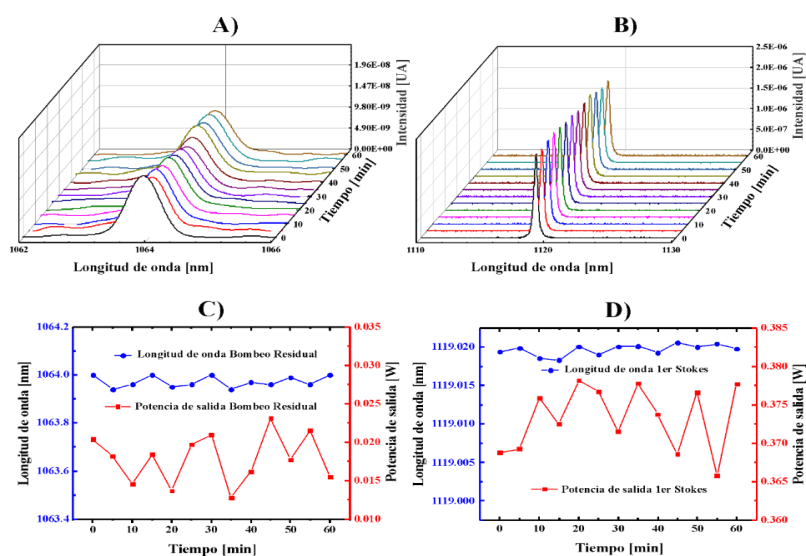


Figura 8

Estabilidad de la emisión láser registrada a temperatura ambiente durante un intervalo de 60 minutos. A) Evolución temporal de la potencia residual. B) Evolución temporal del primer Stokes. C) Variación conjunta de la potencia de salida y de la longitud de onda correspondientes a la potencia residual. D) Variación conjunta de la potencia de salida y de la longitud de onda asociadas al primer Stokes. Todas las mediciones fueron realizadas bajo una potencia de bombeo de 4.3 W.

Con el propósito de verificar la estabilidad de la configuración experimental, se realizaron mediciones de la potencia y la longitud de onda cada 5 minutos durante un periodo total de 60 minutos, empleando una potencia de bombeo de 4.3 W y manteniendo constante la temperatura ambiente. Posteriormente, los resultados fueron analizados para identificar las variaciones tanto en potencia como en longitud de onda. Las Figuras 8, A] y B] muestran los espectros de salida registrados bajo estas condiciones experimentales.

La exposición del sistema a una potencia de bombeo de 4.3 W dio lugar a la aparición de dos componentes espectrales claramente diferenciadas: un pico de bombeo residual de baja intensidad [A] y un pico asociado al primer Stokes generado por el proceso SRS [B].

El análisis de los datos obtenidos evidencia una elevada estabilidad en la potencia de salida. Se detectaron fluctuaciones de aproximadamente 0.01 W en el bombeo residual y de 0.015 W en el primer Stokes. Dichas variaciones, consideradas mínimas, confirman una excelente estabilidad en la conversión de potencia y en la generación del primer Stokes. En cuanto a la longitud de onda, los resultados a temperatura ambiente mostraron ligeras variaciones tanto en el bombeo residual como en el primer Stokes. Esta estabilidad, tanto en potencia como en longitud de onda, se encuentra ilustrada en las Figuras C y D.

Resultados

El análisis experimental de los cuatro arreglos propuestos permitió evaluar cómo influye el tipo de fibra conforme a su longitud y su área efectiva sobre la sensibilidad térmica y la histéresis del sistema basado en un sensor térmico con FBG a 1119 nm.

Box 10

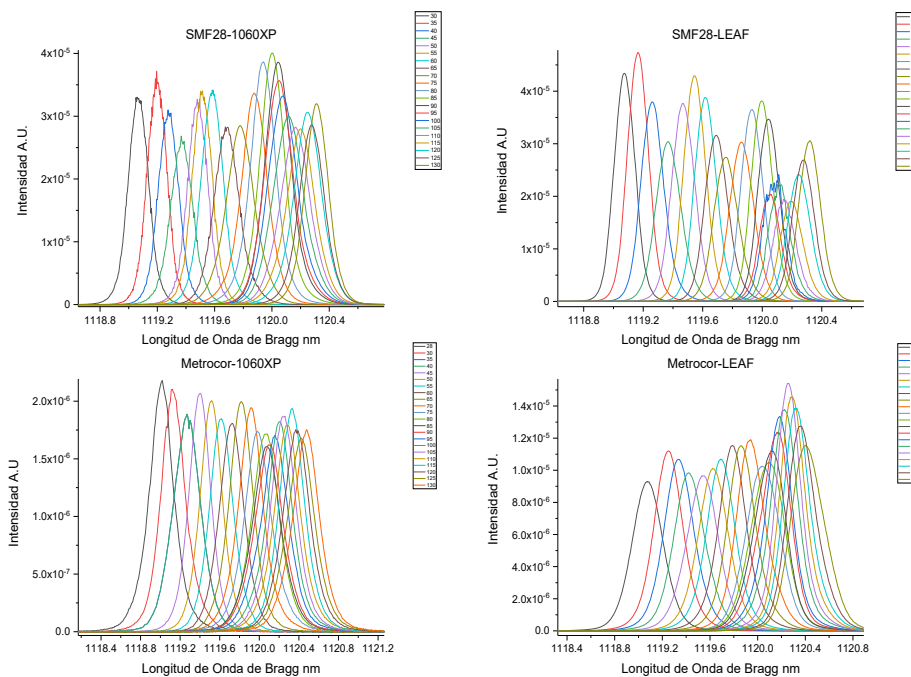


Figura 9

Desplazamiento de longitud de onda de Bragg en los arreglos

En la Figura 9 se muestra el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg en función de la temperatura para cada configuración. Los resultados evidencian un comportamiento lineal en todos los casos, confirmando la capacidad del sistema para detectar variaciones de temperatura con alta precisión. Las sensibilidades obtenidas oscilaron entre 12.7 y 14.32 pm/°C, siendo el arreglo MetroCor-1060XP el que presentó la mayor sensibilidad.

Box 11

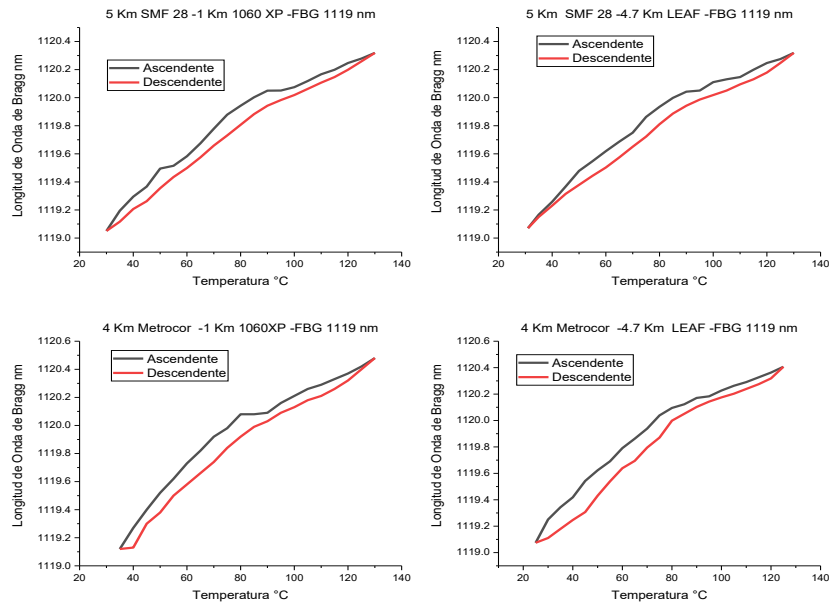


Figura 10

Comportamiento de la histéresis en los 4 arreglos

La Figura 10 presenta el comportamiento de la histéresis en los cuatro arreglos, donde se observa que los valores se mantuvieron reducidos en un rango de 0.14 a 0.23 nm, lo cual demuestra la estabilidad espectral del sistema frente a ciclos de calentamiento y enfriamiento. Esta baja histéresis garantiza la reproducibilidad del sensor y su potencial uso en aplicaciones que demandan exactitud.

Box 12

Tabla 2

Descripción de los resultados obtenidos por arreglo

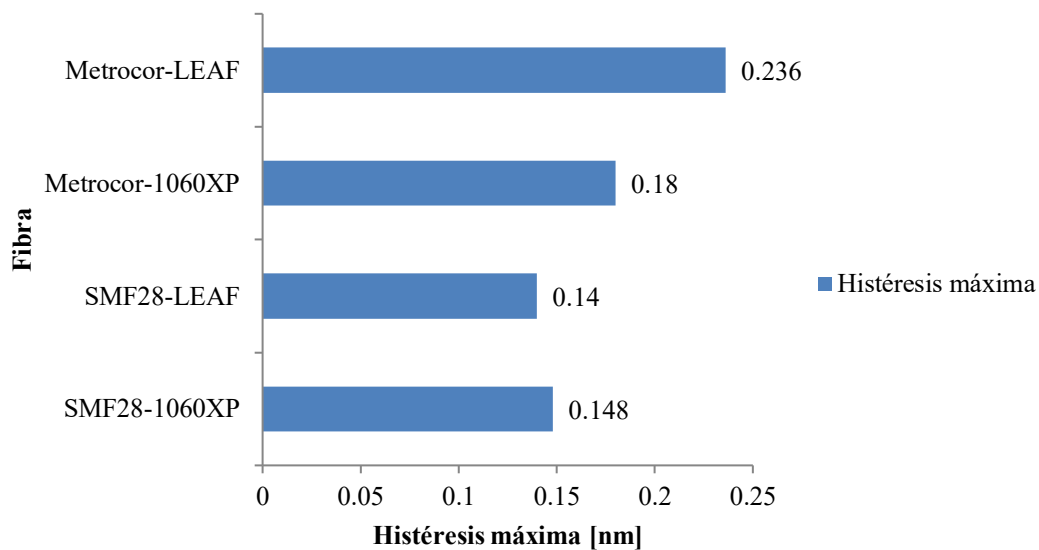
Arreglo	1	2	3	4
Fibra optica utilizada como medio amplificador	4 KM FIBRA METROCOR	4 KM FIBRA METROCOR	5 KM DE FIBRA SMF28	5 KM DE FIBRA SMF28
Fibra optica utilizada para operación	4.7 KM DE FIBRA LEAF	1 KM DE FIBRA 1060XP	4.7 KM DE FIBRA LEAF	1 KM DE FIBRA 1060XP
Area efectiva de la fibra optica	70 μm^2	30 μm^2	70 μm^2	30 μm^2
Variacion de temperatura de la rejilla de BRAGG 1119 nm	30 A 130 °C	30 A 130 °C	30 A 130 °C	30 A 130 °C
Sensibilidad de la rejilla en el arreglo experimental	13.9 pm/ °C	14.32 pm/ °C	13.5 pm/ °C	12.7 pm/ °C
Potencia de salida	0.5 W	0.5 W	0.5 W	0.5 W

La Tabla 2 resume los parámetros de operación y resultados experimentales de cada configuración. Se destaca que, a pesar de las diferencias en área efectiva de las fibras, la potencia de salida registrada fue de aproximadamente 0.5 W en todos los casos, asegurando un desempeño estable del láser Raman bajo una potencia de bombeo de 4.3 W.

Box 13**Tabla 3**

Comparación de histéresis de los 4 arreglos

Fibra	Intervalo [°C]	H_max [nm]	H_max [pm]
SMF28-1060XP	75	0.148	148
SMF28-LEAF	75	0.14	140
Metrocor-1060XP	70	0.18	180

Box 14**Figura 11**

Comparación de Histéresis entre arreglos

Por su parte, la Tabla 3 y la Figura 11 comparan los valores máximos de histéresis. Se observa que el arreglo MetroCor–LEAF presentó el mayor valor [0.236 nm], mientras que la combinación SMF28–LEAF registró el menor [0.14 nm]. Esto evidencia que la elección de las fibras no solo influye en la sensibilidad, sino también en la estabilidad térmica del sistema.

Con estos resultados podemos decir que la integración de fibras con diferentes áreas efectivas y longitudes de propagación permite optimizar tanto la eficiencia Raman como la precisión del sensado.

Conclusiones

El presente trabajo demuestra que la integración de láseres Raman de fibra óptica con rejillas de Bragg [FBG] a 1119 nm constituye una alternativa robusta, precisa y altamente competitiva frente a los sensores ópticos convencionales a 1550 nm. El análisis comparativo entre las configuraciones experimentales — MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km]— evidencia que la selección del medio de ganancia y del medio de operación impacta de manera determinante en la eficiencia Raman, en la generación del primer Stokes y en la sensibilidad térmica del sistema.

Los resultados experimentales, con sensibilidades entre 12.7 y 14.32 pm/°C y una histéresis reducida de 0.14–0.23 nm, validan la estabilidad espectral y la confiabilidad del sensor bajo ciclos repetitivos de calentamiento y enfriamiento. Dicho comportamiento confirma no solo la reproducibilidad del sistema, sino también su potencial para aplicaciones que demandan alta exactitud en la medición de temperatura.

La comparación con desarrollos recientes en sensado térmico óptico [Tabla 4] revela que el diseño propuesto se ubica dentro de los estándares más avanzados, con el valor añadido de operar en una longitud de onda menos explorada, lo cual abre nuevas oportunidades para la investigación y la innovación fotónica. Así, esta propuesta se consolida como una contribución relevante a la generación de conocimiento científico y tecnológico en el campo de los sensores de fibra óptica, con proyección hacia aplicaciones en entornos industriales, biomédicos y de monitoreo remoto.

En síntesis, la investigación no solo aporta evidencia experimental sólida sobre el desempeño de las FBG a 1119 nm, sino que también sienta bases para el desarrollo de sistemas compactos, económicos y de alta precisión

Box 15

Tabla 4

Revisión comparativa de los últimos avances en sensores de temperatura basados en mecanismos de Esparcimiento Raman

Sensor	Sensibilidad [pm/°C] / Rango de Temperatura [°C]	Longitud de Onda de Operación [μm]	Referencia
FBG	13.38/22–500	1.5	[Mandal et al., 2005]
FBG	9.7/25–70	1.5	[Díaz & López-Amo, 2016]
Interferómetro Todo de Fibra	10/30–80	1.5	[Fukano & Ooshima, 2024]
LPFG [Rejilla de Fibra de Período Largo]	8.61/35–60	1.5	[Li et al., 2024]
FBG	11.9/20–150	1.5	[Tung et al., 2024]
FBG	15.07/35–160	1.1	[Coba-Ramos et al., 2025]
Metrocor-LEAF	13.9/35–160	1.1	Este trabajo
Metrocor-1060XP	14.32/35–160	1.1	Este trabajo
SMF28-LEAF	13.5/35–160	1.1	Este trabajo
SMF28-1060XP	12.7/35–160	1.1	Este trabajo

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Coba-Ramos Jesus Alberto: Escribió la versión preliminar del manuscrito

De la Cruz- May Lelio: Contribuyó a la idea del proyecto, al método y a la técnica de investigación.

Benavides, Olena: Revisó cuidadosamente y editó la versión final siguiendo el formato y las directrices.

Meza-Cruz, Onésimo: Completó los formularios requeridos para enviar el artículo

Disponibilidad de datos y materiales

Indique la disponibilidad de los datos obtenidos en esta investigación.

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios.

Agradecimientos

Jesús Alberto Coba Ramos agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías [CONAHCYT] por el apoyo otorgado para la realización de sus estudios de doctorado. Asimismo, los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la UNACAR por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

Abreviaturas

FBG	Rejilla de Bragg en Fibra [Fier Bragg Grating]
TEM	Modo Transversal Eléctrico [Transverse Electric Mode]
WDM	Multiplexor por División en Longitud de Onda [Wavelength Division Multiplexer]
SRS	Esparcimiento Raman Estimulado [Stimulated Raman Scattering]
OSA	Analizador de Espectro Óptico [Optical Spectrum Analyzer]
PM	Medidor de Potencia [Power Meter]
FWHM	Ancho Completo a Media Altura [Full Width at Half Maximum]
TCS	Sistema de Control de Temperatura [Temperature Control System]

Referencias

Antecedentes.

- [Feng, 2017] Feng, Y. [Ed.]. [2017]. *Raman Fiber Lasers*. Springer Series in Optical Sciences, Vol. 207. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-65276-4.
- [Agrawal, 2013] Agrawal, G. P. [2013]. *Nonlinear Fiber Optics [5th ed.]*. Academic Press. ISBN: 978-0-12-397023-7, pp. 295–303.
- [Islam, 2002] Islam, M. N. [Ed.]. [2002]. *Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles*. Springer.
- [De la Cruz-May et al., 2023] De la Cruz-May, L., Mejia-Beltran, E., Benavides, O., Flores-Gil, A., Pages-Pacheco, A. Y., & Alvarez-Chavez, J. A. [2023]. *Maximum pump power coupled in Raman resonator for maximum power delivered at 1115 and 1175 nm*. *Photonics*, 10[5], 531. MDPI.
- [Islam, 2004] Islam, M. N. [Ed.]. [2004]. *Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-Systems and Systems*. Springer.
- [Agrawal, 2010] Agrawal, G. P. [2010]. *Fiber-Optic Communication Systems [4th ed.]*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [Pages-Pacheco et al., 2023] Pages-Pacheco, A. Y., De la Cruz-May, L., Mejía-Beltrán, E., & Flores-Gil, A. [2023]. *Modelización de un láser Raman de fibra óptica en cascada*. *Engineering and Applied Sciences. Handbooks-TI-©ECORFAN-México*, Ciudad de México, 6[9], 18–34.
- [Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. *Fiber Optic Sensors [2nd ed.]*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4
- [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. *Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement*. *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings](#) [2nd ed.]. Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

Básicos

[Feng, 2017] Feng, Y. [Ed.]. [2017]. [Raman Fiber Lasers](#). Springer Series in Optical Sciences, Vol. 207. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-65276-4.

[Agrawal, 2013] Agrawal, G. P. [2013]. [Nonlinear Fiber Optics](#) [5th ed.]. Academic Press. ISBN: 978-0-12-397023-7, pp. 295–303.

[Islam, 2002] Islam, M. N. [Ed.]. [2002]. [Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles](#). Springer.

[De la Cruz-May et al., 2023] De la Cruz-May, L., Mejia-Beltran, E., Benavides, O., Flores-Gil, A., Pages-Pacheco, A. Y., & Alvarez-Chavez, J. A. [2023]. [Maximum pump power coupled in Raman resonator for maximum power delivered at 1115 and 1175 nm](#). *Photonics*, 10[5], 531. MDPI.

[Islam, 2004] Islam, M. N. [Ed.]. [2004]. [Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-Systems and Systems](#). Springer.

[Agrawal, 2010] Agrawal, G. P. [2010]. [Fiber-Optic Communication Systems](#) [4th ed.]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[Pages-Pacheco et al., 2023] Pages-Pacheco, A. Y., De la Cruz-May, L., Mejía-Beltrán, E., & Flores-Gil, A. [2023]. [Modelización de un láser Raman de fibra óptica en cascada](#). *Engineering and Applied Sciences. Handbooks-TI-©ECORFAN-México*, Ciudad de México, 6[9], 18–34.

[Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. [Fiber Optic Sensors](#) [2nd ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4

[Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. [Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement](#). *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings](#) [2nd ed.]. Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

Soporte

[Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. [Fiber Optic Sensors](#) [2nd ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4

[Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. [Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement](#). *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings \[2nd ed.\]](#). Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

[Mandal et al., 2005] Mandal, J., Shen, Y., Pal, S., Sun, T., Grattan, K. T., & Augousti, A. T. [2005]. [Bragg grating tuned fiber laser system for measurement of wider range temperature and strain](#). *Optics Communications*, 244[1–6], 111–121.

[Díaz & López-Amo, 2016] Díaz, S., & López-Amo, M. [2016]. [Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements](#). *Optics & Laser Technology*, 78, 134–138.

[Fukano & Ooshima, 2024] Fukano, H., & Ooshima, K. [2024]. [Fabry–Perot interference temperature sensor integrated high-power-laser optical fiber probe for laser ablation](#). *Japanese Journal of Applied Physics*, 63[5], 05SP01.

[Li et al., 2024] Li, H., Wang, W., Sun, H., Wu, H., Wang, X., Zheng, A., Liang, L., Lu, L., Zhu, J., Yu, Q., et al. [2024]. [Temperature-compensated high-sensitivity refractive index, liquid level and pH sensing realization enabled by a small-period microfiber long period grating cascaded with microfiber Bragg grating](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115402.

[Tung et al., 2024] Tung, H. J., Ibrahim, R. K. R., Azmi, A. I., Husein, N. A., Vargas-Rodriguez, E., Alresheedi, M. T., Ng, E. K., & Mahdi, M. A. [2024]. [Fiber laser tuning by means of nonthermal plasma as a temperature regulator](#). *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34297.

[Coba-Ramos et al., 2025] Coba-Ramos, J. A., de la Cruz-May, L., Pages-Pacheco, A. Y., Mejía-Beltrán, E., Jauregui-Vazquez, D., May-Alarcon, M., Sanchez-Lara, R., & Alvarez Chavez, J. A. [2025]. [Optimized dual-Stokes Raman laser for 1.1 \$\mu\text{m}\$ emission and temperature sensing](#). *Photonics*, 12[5], 470. MDPI.

Diferencias

[Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. *Fiber Optic Sensors [2nd ed.]*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4

[Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. [Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement](#). *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings \[2nd ed.\]](#). Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

[Mandal et al., 2005] Mandal, J., Shen, Y., Pal, S., Sun, T., Grattan, K. T., & Augusti, A. T. [2005]. [Bragg grating tuned fiber laser system for measurement of wider range temperature and strain](#). *Optics Communications*, 244[1–6], 111–121.

[Díaz & López-Amo, 2016] Díaz, S., & López-Amo, M. [2016]. [Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements](#). *Optics & Laser Technology*, 78, 134–138.

[Fukano & Ooshima, 2024] Fukano, H., & Ooshima, K. [2024]. [Fabry–Perot interference temperature sensor integrated high-power-laser optical fiber probe for laser ablation](#). *Japanese Journal of Applied Physics*, 63[5], 05SP01.

[Li et al., 2024] Li, H., Wang, W., Sun, H., Wu, H., Wang, X., Zheng, A., Liang, L., Lu, L., Zhu, J., Yu, Q., et al. [2024]. [Temperature-compensated high-sensitivity refractive index, liquid level and pH sensing realization enabled by a small-period microfiber long period grating cascaded with microfiber Bragg grating](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115402.

[Tung et al., 2024] Tung, H. J., Ibrahim, R. K. R., Azmi, A. I., Husein, N. A., Vargas-Rodriguez, E., Alresheedi, M. T., Ng, E. K., & Mahdi, M. A. [2024]. [Fiber laser tuning by means of nonthermal plasma as a temperature regulator](#). *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34297.

[Coba-Ramos et al., 2025] Coba-Ramos, J. A., de la Cruz-May, L., Pages-Pacheco, A. Y., Mejía-Beltrán, E., Jauregui-Vazquez, D., May-Alarcon, M., Sanchez-Lara, R., & Alvarez Chavez, J. A. [2025]. [Optimized dual-Stokes Raman laser for 1.1 \$\mu\text{m}\$ emission and temperature sensing](#). *Photonics*, 12[5], 470. MDPI.

Discusiones

[Mandal et al., 2005] Mandal, J., Shen, Y., Pal, S., Sun, T., Grattan, K. T., & Augusti, A. T. [2005]. [Bragg grating tuned fiber laser system for measurement of wider range temperature and strain](#). *Optics Communications*, 244[1–6], 111–121.

[Díaz & López-Amo, 2016] Díaz, S., & López-Amo, M. [2016]. [Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements](#). *Optics & Laser Technology*, 78, 134–138.

[Fukano & Ooshima, 2024] Fukano, H., & Ooshima, K. [2024]. [Fabry–Perot interference temperature sensor integrated high-power-laser optical fiber probe for laser ablation](#). *Japanese Journal of Applied Physics*, 63[5], 05SP01.

[Li et al., 2024] Li, H., Wang, W., Sun, H., Wu, H., Wang, X., Zheng, A., Liang, L., Lu, L., Zhu, J., Yu, Q., et al. [2024]. [Temperature-compensated high-sensitivity refractive index, liquid level and pH sensing realization enabled by a small-period microfiber long period grating cascaded with microfiber Bragg grating](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115402.

[Tung et al., 2024] Tung, H. J., Ibrahim, R. K. R., Azmi, A. I., Husein, N. A., Vargas-Rodriguez, E., Alresheedi, M. T., Ng, E. K., & Mahdi, M. A. [2024]. [Fiber laser tuning by means of nonthermal plasma as a temperature regulator](#). *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34297.

[Coba-Ramos et al., 2025] Coba-Ramos, J. A., de la Cruz-May, L., Pages-Pacheco, A. Y., Mejía-Beltrán, E., Jauregui-Vazquez, D., May-Alarcon, M., Sanchez-Lara, R., & Alvarez Chavez, J. A. [2025]. [Optimized dual-Stokes Raman laser for 1.1 \$\mu\text{m}\$ emission and temperature sensing](#). *Photonics*, 12[5], 470. MDPI.