

Capítulo 7 Dopado y Adelgazamiento de la Fibra Óptica para el Sensado de Temperatura

Chapter 7 Doping and Tapering of Optical Fibers for Temperature Sensing

SANCHEZ-LARA, Rafael†*, RODRIGUEZ-BLANCO, Marco A., TORAL-CRUZ, Homero y ALVAREZ-CHÁVEZ, José A.

University Autónoma del Carmen (UNACAR), Facultad de Ingeniería, C.56, No. 4, C.P. 24180, Cd. Del Carmen, Campeche, México.

Universidad de Quintana Roo (UQROO), División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo, México.

Optical Sciences Group, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

ID 1^{er} Autor: *Rafael, Sánchez-Lara* / **ORC ID:** 0000-0001-6587-1972, **CVU CONACYT ID:** 88144

ID 1^{er} Coautor: *Marco Antonio, Rodríguez-Blanco* / **ORC ID:** 0000-0003-3641-6895, **CVU CONACYT ID:** 92331

ID 2^{do} Coautor: *Homero, Toral-cruz* / **ORC ID:** 0000-0002-4421-3775, **CVU CONACYT ID:** 44459

ID 3^{er} Coautor: *José Alfredo, Álvarez-Chávez* / **ORC ID:** 0000-0003-0451-2815

DOI: 10.35429/H.2021.16.58.70

R. Sánchez, M. Rodríguez, H. Toral y J. Alvarez

*rsanchez@pampano.unacar.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

En este trabajo se analiza la sensibilidad de un láser de fibra óptica dopada con tierras raras bajo el efecto de la variación de la temperatura y del perfil de adelgazamiento de la fibra óptica, esto con la finalidad de poder mostrar la viabilidad de uso de la fibra óptica adelgazada como un sensor de temperatura. De manera general se puede apreciar que un perfil parabólico en la fibra adelgazada conduce a una mayor sensibilidad por efecto de temperatura. También se encontró que a régimen de potencias de bombeo bajos se incrementa la sensibilidad a la temperatura. La fibra dopada con Holmio es menos sensible a los cambios de temperatura y presenta conversión de potencia a distancias más cortas. Los resultados permiten obtener una herramienta para el diseño de láseres y sensores de fibras ópticas dopadas.

Fibras dopadas, Laser, Temperatura, Sensor, Tierras raras

Abstract

In this work, the sensitivity of a rare earth doped fiber optic laser is analyzed under the effect of temperature and tapering of the optical fiber; this in order to show the viability to use a tapered optical fiber as a temperature sensor. In general, it can be seen that a parabolic profile in the tapered fiber leads to higher sensitivity. It was also found that the sensitivity increases as pump powers decreases. Holmium-doped fiber is less sensitive to temperature changes and exhibits power conversion at shorter distances. The results are a tool for the design of doped optical fiber lasers and sensors.

Doped fibers, Laser, Temperature, Sensor, Rare earths.

1. Introducción

Hoy en día la fibra óptica se ha sido utilizada en muchas aplicaciones, uno de ellos es emplearla como sensor, ya que en el ámbito industrial cada vez se demanda más tecnología que brinde una mayor seguridad y que no sea susceptible a interferencia electromagnética (Sukkar K, 2017, Amini S, 2017). Hay muchas fuentes de investigación al respecto, algunos han trabajado en la medición del desempeño de la fibra en su estado natural, utilizando técnicas de interferometría, rejillas de Bragg, rejillas de período largo, acopladores de fibra óptica y fibras adelgazadas. El principio utilizado en estos experimentos es aprovechar la dependencia con la temperatura del material dieléctrico de la fibra el cual modifica el comportamiento de la potencia de luz láser transmitida en el extremo de la fibra óptica (Zhu S, 2011). Otros trabajos de investigación se han enfocado en alterar la estructura interna de la fibra óptica mediante el dopado con tierras raras, el principio utilizado es la dependencia con la temperatura del tiempo de vida de fluorescencia en la fibra óptica dopada, es decir, existe variación en el área de sección transversal, tanto del láser de bombeo como de la señal en un amplificador de fibra dopada ((Trpkovski S, 2005, Castellon-Urbe J, 2010).

En el afán de contribuir con el desarrollo de estas técnicas, este trabajo muestra cómo medir el desempeño de fibras dopadas con diferentes tierras raras y en diferentes perfiles de adelgazamiento de la fibra, bajo el principio de variación del área de sección transversal con la temperatura. Se presentará el modelado matemático para incluir el efecto de la variación de la temperatura en un amplificador de fibra adelgazada dopada con Iterbio (Yb), Tulio (Th), y Holmio (Ho); en el análisis se comparará el desempeño de estas tres tierras raras como dopado de la fibra óptica para el sensado de temperatura.

2. Modelado

En el modelo se considera que la sección de la fibra adelgazada está rodeada con aire, estos casos ya han sido considerado en otros estudios con fibras no dopadas, donde no se considera el efecto de la temperatura. En nuestro caso nos interesaría investigar las variaciones de potencia transmitida debido a la sensibilidad por temperatura en la emisión espontánea amplificada en el núcleo de la fibra adelgazada. Es importante modelar el patrón de intensidad transversal en el núcleo, ya que esta determina la conversión de energía entre la radiación de bombeo y la señal. Consideraremos una forma Gaussiana para los modos fundamentales del Bombeo y la señal transmitida dentro de la fibra adelgazada El patrón de intensidad transversal usando una aproximación Gaussiana se expresaría como:

$$f_{p,s}(r) = \frac{1}{\pi\Omega^2} e^{-r^2/\Omega^2} \quad (1)$$

Donde los subíndices p y s se refieren a la radiación del bombeo y la señal, y Ω se determina mediante el índice de refracción y el radio del núcleo y revestimiento respectivamente. El factor de multiplicación se eligió para normalizar $f(r)$ en la siguiente forma:

$$2\pi \int f_{p,s}(r) * dr = 1.$$

En una fibra de índice de refracción escalonado, Ω se aproxima como:

$$\Omega = a * J_0(U) * \frac{V}{U} * \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (2)$$

donde a es el radio del núcleo, y

$$U = a * \sqrt{k^2 * n_1^2 - \beta^2},$$

$$W = a * \sqrt{\beta^2 - k^2 * n_2^2},$$

$$V = k * a * \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

$$k = 2 * \pi / \lambda,$$

n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y el revestimiento, respectivamente. β es la constante de propagación del modo bombeo o señal. Para un valor de V , el valor de W se puede obtener de la siguiente expresión:

$$W = 1.1428 * V - 0.996,$$

La expresión anterior solo es válida para fibras de índice escalonado. De acuerdo a los valores de longitud de onda de la radiación de bombeo y señal, se puede determinar los valores de U , W , y V mediante la siguiente expresión de la apertura numérica de la fibra:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ y el cálculo del parámetro } \Omega. \text{ El procedimiento es preciso para } 1.5 < V < 2.5.$$

Para el análisis del efecto térmico, se parte de trabajos anteriores donde se han reportado cambios en la población de los niveles de energía en fibras dopadas. Existe modificación en las secciones transversales de emisión y absorción para las radiaciones del bombeo y la señal, y esto dependerá del tipo de dopado en la fibra, concentraciones de dopado, y el grado de desorden de la estructura del vidrio usado en diferentes tipos de fibras activas.

Usaremos los cambios en los coeficientes de absorción y emisión transversales para 3 diferentes tipos de dopado (Ytb, Th y Ho), iniciaremos el análisis con el Iterbio, sin embargo, el modelado utilizado sería similar a Th y Ho:

Iterbio:

$$\sigma(T) = \sigma(20^\circ C) + \frac{d\sigma}{dT} * \Delta T \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_{abs}^{1064nm}}{dT} = 7.78 * 10^{-29} m^2 / ^\circ K \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_{em}^{1064nm}}{dT} = -2.44 * 10^{-28} m^2 / ^\circ K \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma_{abs}^{976nm}}{dT} = \frac{d\sigma_{em}^{976nm}}{dT} = -1.63 * 10^{-27} m^2 / ^\circ K \quad (6)$$

Donde, σ_{abs}^{1064nm} y σ_{em}^{1064nm} son los coeficientes de absorción y emisión transversales para la radiación de señal y, σ_{abs}^{976nm} and σ_{em}^{976nm} son los coeficientes de absorción y emisión transversales para la radiación del bombeo.

Tulio:

$$\sigma_{abs}^{1650nm}(T) = 15.56 * 10^{-25} - 38 * 10^{-28} * T \quad (7)$$

$$\sigma_{em}^{1650nm}(T) = 1.8 * 10^{-26} + 1.99 * 10^{-28} * T \quad (8)$$

$$\sigma_{abs}^{1841nm}(T) = -1.96 * 10^{-26} + 3.53 * 10^{-28} * T \quad (9)$$

$$\sigma_{em}^{1841nm}(T) = 3.75 * 10^{-25} - 1.57 * 10^{-29} * T \quad (10)$$

Holmio:

$$\sigma_{abs}^{1940}(T) = 2.21 * 10^{-24} - 6.49 * 10^{-27} T \quad (11)$$

$$\sigma_{em}^{1940}(T) = 1.59 * 10^{-24} - 4.34 * 10^{-27} T \quad (12)$$

$$\sigma_{abs}^{2090}(T) = 9.09 * 10^{-26} + 1.01 * 10^{-27} T \quad (13)$$

$$\sigma_{em}^{2090}(T) = 3.54 * 10^{-24} - 1.04 * 10^{-26} T \quad (14)$$

Como se puede observar para cada tierra rara, las longitudes de onda de la absorción y emisión son diferentes, además de su dependencia con la temperatura. Para el modelado del amplificador se inicia con el siguiente par de ecuaciones acopladas donde se considera el efecto de la temperatura:

$$\frac{dI_p(r, z)}{dz} = (\sigma_{em}^p(T) * n_2(T) - \sigma_{abs}^p(T) * n_1(T)) * N_{tot} * I_p(r, z) \quad (15)$$

$$\frac{dI_s(r, z)}{dz} = (\sigma_{em}^s(T) * n_2(T) - \sigma_{abs}^s(T) * n_1(T)) * N_{tot} * I_s(r, z) \quad (16)$$

donde, $I_p(r, z)$ e $I_s(r, z)$ son las intensidades de la radiación de bombeo y señal, N_{tot} es la población del dopado, σ_{abs}^p , σ_{em}^p , σ_{abs}^s , σ_{em}^s son los coeficientes de absorción y emisión transversal dependientes de la temperatura para el bombeo y señal respectivamente, y $n_1(T)$, $n_2(T)$ son las poblaciones de estado superior e inferior del dopado dependientes de la temperatura, los cuales son considerados en estado estacionario en acuerdo a las siguientes expresiones:

$$n_2 = \frac{R_{abs} + W_{abs}}{R_{abs} + R_{em} + W_{abs} + W_{em} + A_{esp}} \quad (17)$$

$$n_1 = 1 - n_2 \quad (18)$$

Donde, $R_{abs} = \sigma_{abs}^p I_p h \nu_p$, $R_{em} = \sigma_{em}^p I_p h \nu_p$, $W_{abs} = \sigma_{abs}^s I_s h \nu_s$, and $W_{em} = \sigma_{em}^s I_p h \nu_s$.

En las ecuaciones anteriores no se considera la generación de ruido amplificado espontáneo, solo se considera los efectos del perfil de adelgazamiento y temperatura.

Para considerar los efectos del adelgazamiento y el traslape de los modos fundamentales del bombeo y señal con el núcleo activo usamos la siguiente expresión

$$I_{p,s}(r, z) = P_{p,s}(z) * f_{p,s}(r) \quad (19)$$

Los subíndices p y s son la radiación de bombeo y señal, $P_{p,s}(z)$ son la potencia del bombeo y señal dependiente de z , y $f(r)$ es la expresión dada por la Eq. 1. Se puede observar que el efecto del adelgazamiento y la temperatura en el parámetro Ω definido en la Eq. 2 modifica directamente la evolución de la intensidad de bombeo y señal descrito en Eq. 7 and 8.

Al considerar la potencia de bombeo para cualquier valor de z , obtenemos la siguiente expresión:

$$P_{p,s}(z) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I_{p,s}(r, z) * r * dr * d\varphi = 2\pi * \int_0^{\infty} I_{p,s}(r, z) * r * dr \quad (20)$$

donde:

$$\frac{dP_{p,s}(z)}{dz} = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{d * I_{p,s}(r, z)}{dz} * r * dr \quad (21)$$

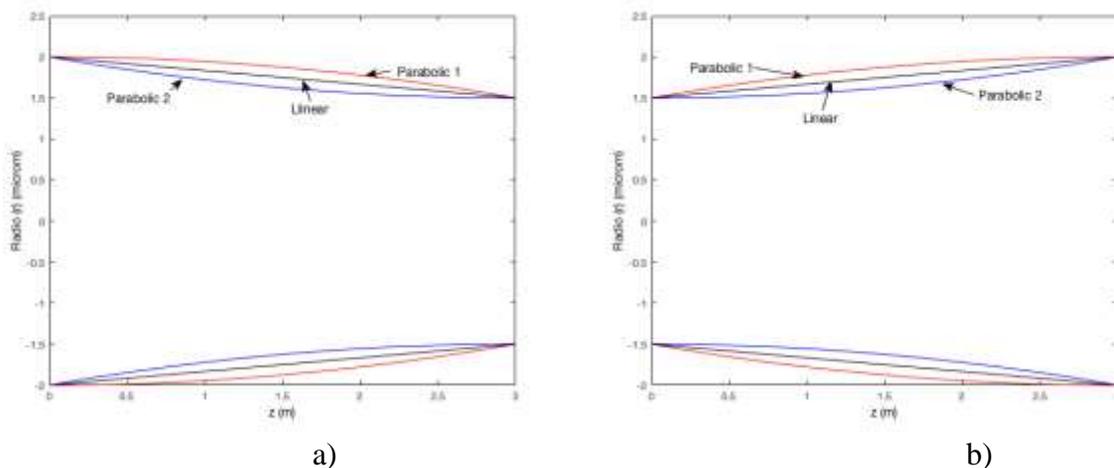
Se puede reescribir la Eq. 15 y 16 usando las Eq. 19 and 21:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = 2 * \pi * \int_0^{a(z)} \left(\sigma_{em}^p(T) * n_2(T) - \sigma_{abs}^p(T) * n_1(T) \right) * N_{tot} * P_p(z) * f_p(r) * r * dr \quad (22)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = 2 * \pi * \int_0^{a(z)} \left(\sigma_{em}^s(T) * n_2(T) - \sigma_{abs}^s(T) * n_1(T) \right) * N_{tot} * P_s(z) * f_s(r) * r * dr \quad (23)$$

Se está considerando que la fibra está dopada con concentración uniforme en el núcleo del radio a , el cual depende de z . También se puede notar también que $n_1(T)$ y $n_2(T)$ dependen de $f_{p,s}(r)$ debido a sus relaciones con las intensidades I_p e I_s . Una vez definidos las ecuaciones de potencias dependientes con la temperatura, se puede modelar los perfiles de adelgazamiento longitudinal del núcleo de la fibra para diferentes esquemas de bombeo como se muestra en la figura 1.

Figura 1 Perfiles de adelgazamiento en los amplificadores dopados, con potencia de bombeo en co-propagación con la señal con diferentes terminaciones: a) Bombeo con un radio amplio al inicio (Taper 1), b) Bombeo con un radio angosto al inicio (Taper 2)



Fuente: Elaboración Propia

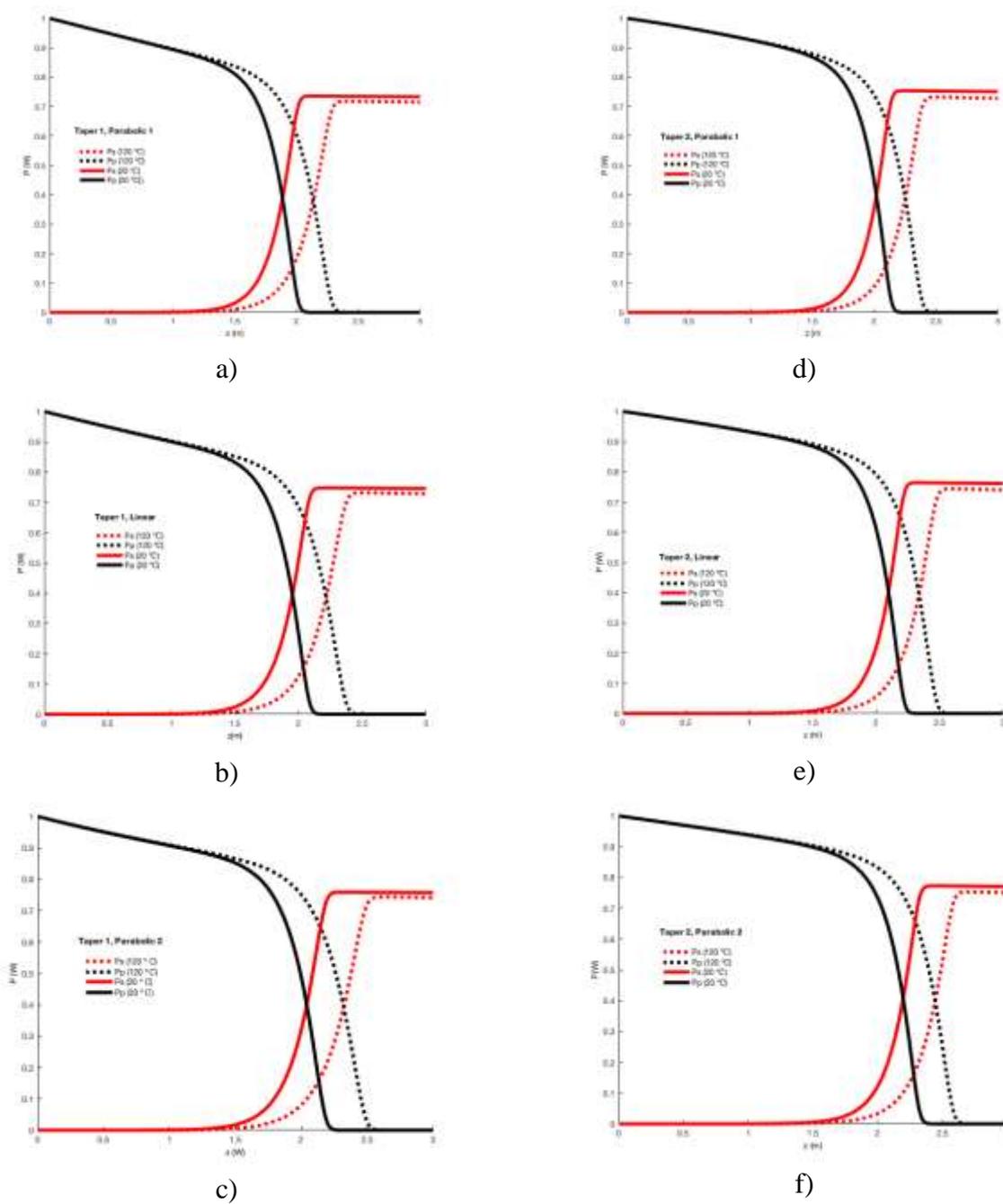
3. Análisis de resultados

Analizaremos primeramente la conversión de energía de bombeo a señal en dos diferentes perfiles de adelgazamiento que llamaremos Taper 1 y Taper 2, mostrados en la figura 1a y 1b, respectivamente. Se considera una $NA=0.18$ constante y una temperatura variable. De manera detallada mostraremos el procedimiento para el dopado con Iterbio y posteriormente procederemos a dar los resultados para Tulio y Holmio.

Iterbio:

Las longitudes de onda del bombeo y señal son $976nm$ and $1064nm$, respectivamente. La potencia de bombeo para ambos perfiles de adelgazamiento (Tapers) se establecen a $1W$ y los resultados de conversión de energía para dos temperaturas diferentes se muestra en la figura 2 para cada Taper.

Figura 2. Amplificador dopado con Yb. Evolución de la potencia de bombeo y señal a dos temperaturas, potencia de bombeo a $1W$ y diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo activo, a), b) and c) Taper 1 d), e) y f) Taper 2



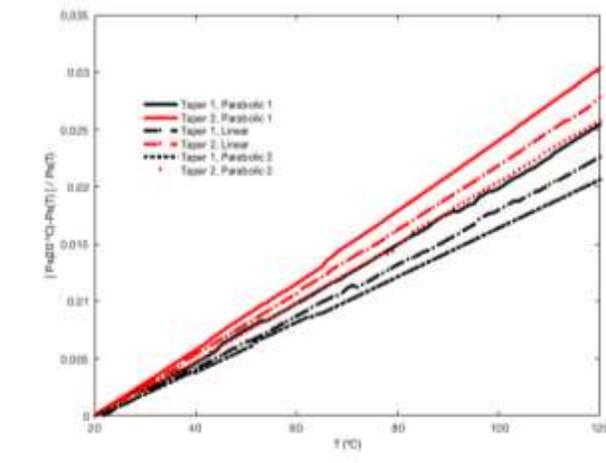
Fuente: Elaboración Propia

Un punto importante a observar en los resultados de la figura 2 es el punto de intersección de la curva de radiación de bombeo y señal, el cual para diferentes temperaturas se modifica, indicando de esta manera cual perfil en cada Taper afecta más el desempeño del amplificador bajo diferentes temperaturas y longitudes de fibra. Para medir esta sensibilidad, se analiza la eficiencia de conversión de energía en el extremo de la fibra a diferentes temperaturas T tomando como referencia la conversión a 20°C , se utilizará la siguiente expresión para calcular esta eficiencia:

$$[P_s(20^{\circ}\text{C}) - P_s(T)] / P_s(20^{\circ}\text{C}) \quad (24)$$

La ecuación se aplica para cada perfil considerado con una longitud de fibra de 3 m y potencia de bombeo de 1 W. Estos resultados se muestran en la figura 3.

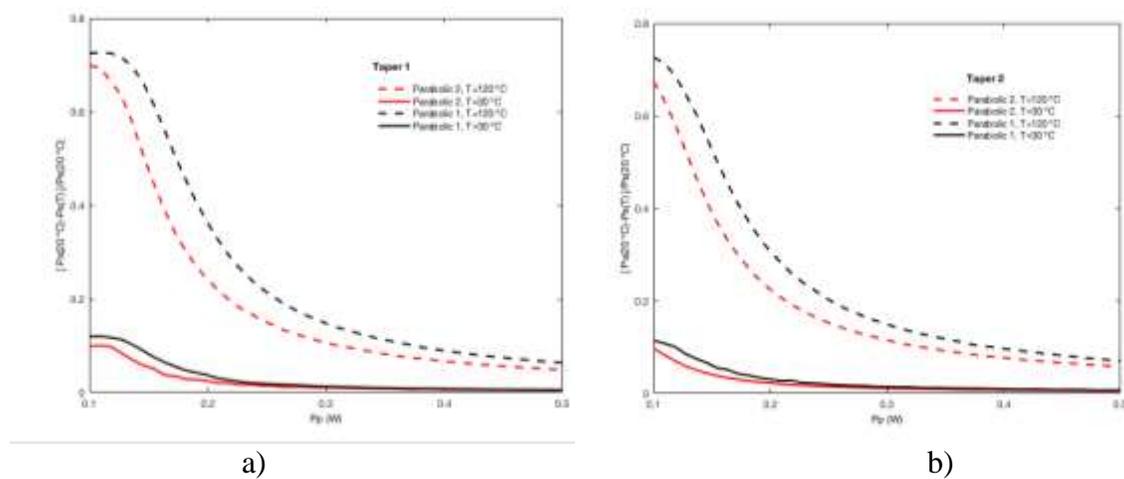
Figura 3 Sensibilidad en Yb a diferentes Temperaturas para los Tapers 1 y 2, con diferentes perfiles de adelgazamiento



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 3, se puede visualizar que existe una sensibilidad más alta a altos valores de temperatura, además se puede observar que en el Taper 2 hace el amplificador más sensible a la temperatura en todos los perfiles de adelgazamiento del núcleo. Las líneas punteadas presentan valores más altos de sensibilidad que las líneas continuas, en particular el perfil denominado parabólico 1 se obtiene una mejora de la sensibilidad del amplificador de fibra adelgazada. La figura 4 muestra los cambios de la sensibilidad cuando modificamos la potencia de bombeo a 30°C y 120°C .

Figura 4 Comportamiento de la sensibilidad en Iterbio variando la potencia de bombeo de 0.1 a 0.5 W a dos temperaturas $T=30^{\circ}\text{C}$ y 120°C , para diferentes perfiles de Tapers, a) Taper 1, b) Taper 2

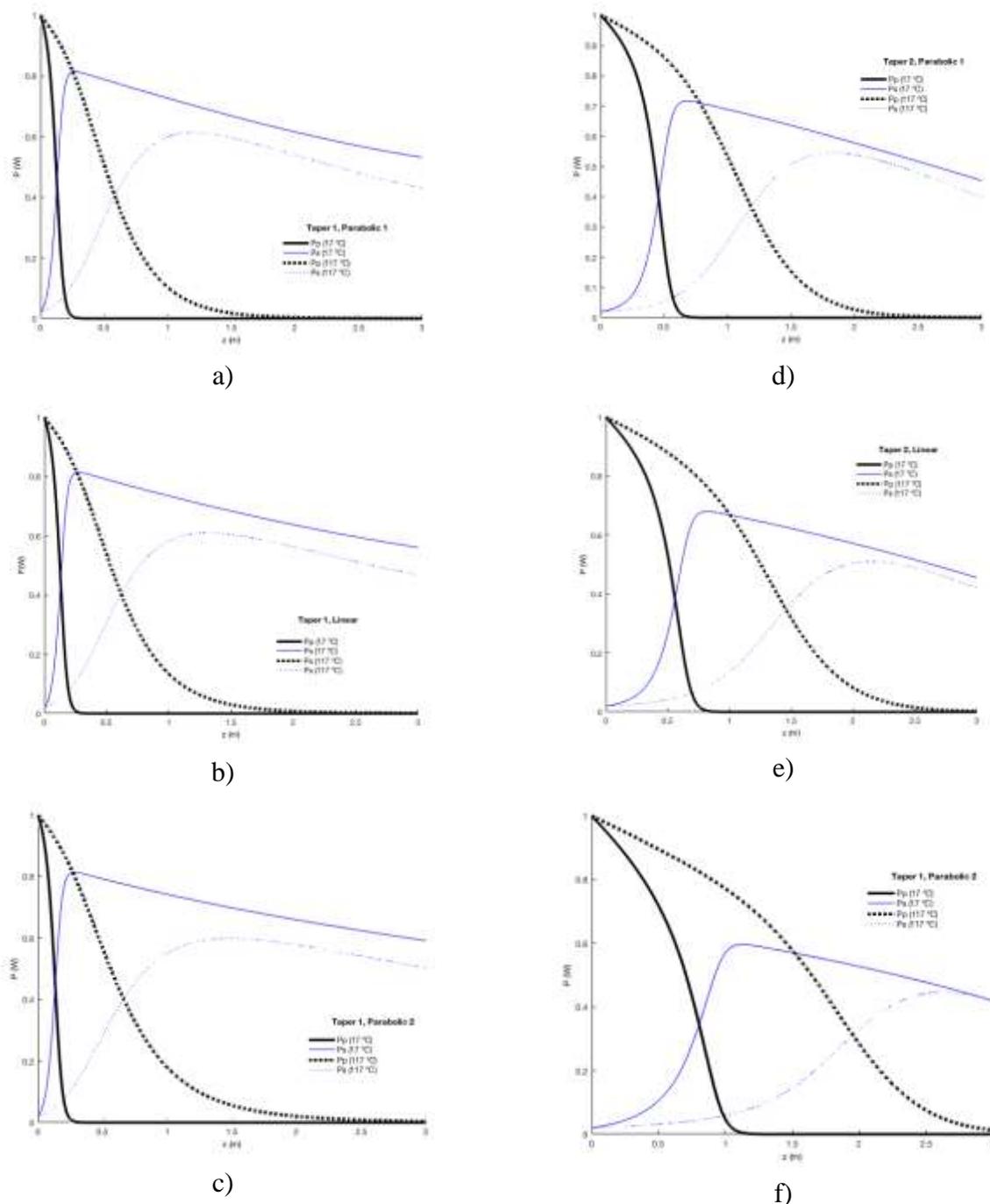


Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 4 podemos observar un dato interesante, la sensibilidad incrementa con valores más bajos de potencia de bombeo, y es diferente dependiendo del Taper y perfil de adelgazamiento.

Como apreciamos en figura 2, esta sensibilidad se puede incrementar cuando la longitud de la fibra está entre 2-2.5 m, donde se encuentran los puntos de intersección entre el residual de bombeo y la señal. De manera similar para el dopado con Tulio, la temperatura es considerado de 17 °C to 117 °C. La potencia de bombeo y de señal en co-propagación se establece en 1 W y 20 mW, respectivamente. Los resultados de conversión de señal para dos temperaturas se muestran en la figura 5 para ambos Tapers con sus respectivos perfiles de adelgazamiento.

Figura 5 Amplificador dopado con Th. Evolución de la potencia de bombeo y señal a dos temperaturas, potencia de bombeo a 1 W y diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo activo, a), b) and c) Taper 1 d), e) y f) Taper 2



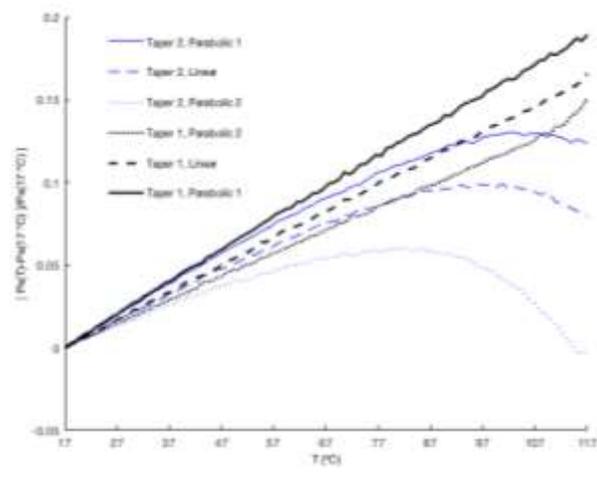
Fuente: Elaboración Propia

Se puede analizar la sensibilidad a los cambios de temperatura con la misma expresión usada anteriormente: $\Delta = [P_s(17^\circ\text{C}) - P_s(T)] / P_s(17^\circ\text{C})$, los resultados se muestran en la figura 6 y 7. De acuerdo a la figura 6, todos los amplificadores muestran un incremento en la sensibilidad a partir de los 27 °C hasta un máximo de 117°C. Las curvas para el Taper 2 se saturan en 87 °C aproximadamente, indicando una pérdida de sensibilidad con respecto a la curva del Taper 1.

Sin embargo, este comportamiento puede variar modificando las longitudes del Taper, es decir de la gráfica de la figura 5 podríamos elegir algún perfil de adelgazamiento con mayor sensibilidad en base a los puntos de intersección para mejorar la sensibilidad a una temperatura específica.

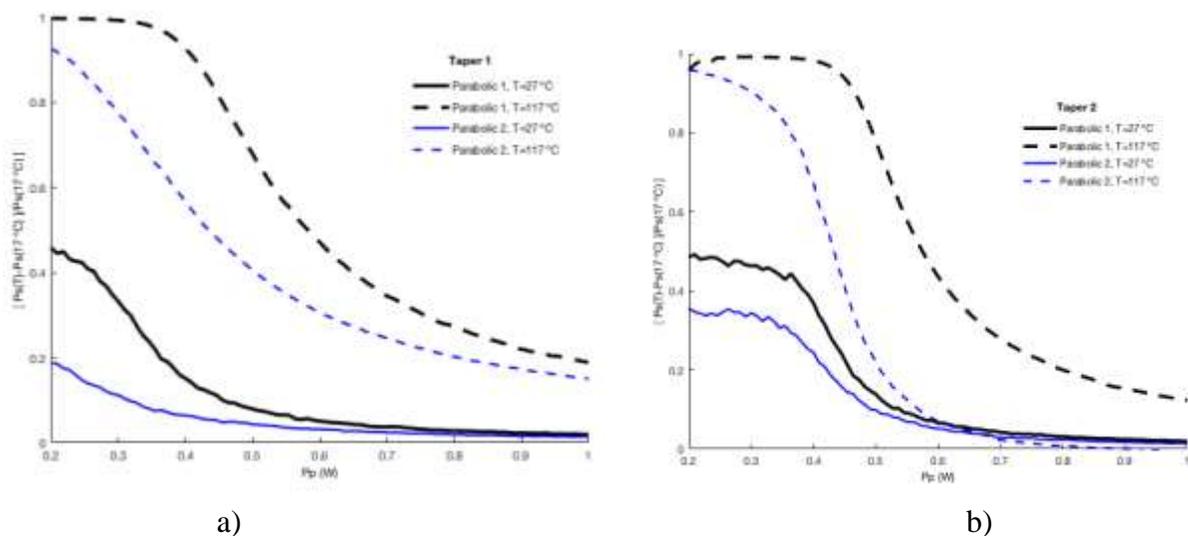
La figura 7 muestra cómo cambia la sensibilidad con respecto a la potencia de bombeo para diferentes perfiles de ambos Tapers, se usaron las temperaturas de 27 y 117 °C. De la misma manera la señal se calcula en el extremo de la fibra de 3 m en acuerdo a la figura 1. La sensibilidad crece conforme incrementa la temperatura y disminuye con valores bajos de potencia de bombeo. Por lo que podemos decir que la sensibilidad de la radiación de señal es mayor a potencias de bombeo bajas y dependiendo del perfil de Taper utilizado.

Figura 6 Sensibilidad en Th a diferentes Temperaturas para los Tapers 1 y 2, con diferentes perfiles de adelgazamiento



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7 Comportamiento de la sensibilidad en Th variando la potencia de bombeo de 0.2 a 1 W a dos temperaturas T=300 y 390°K, para diferentes perfiles de Tapers



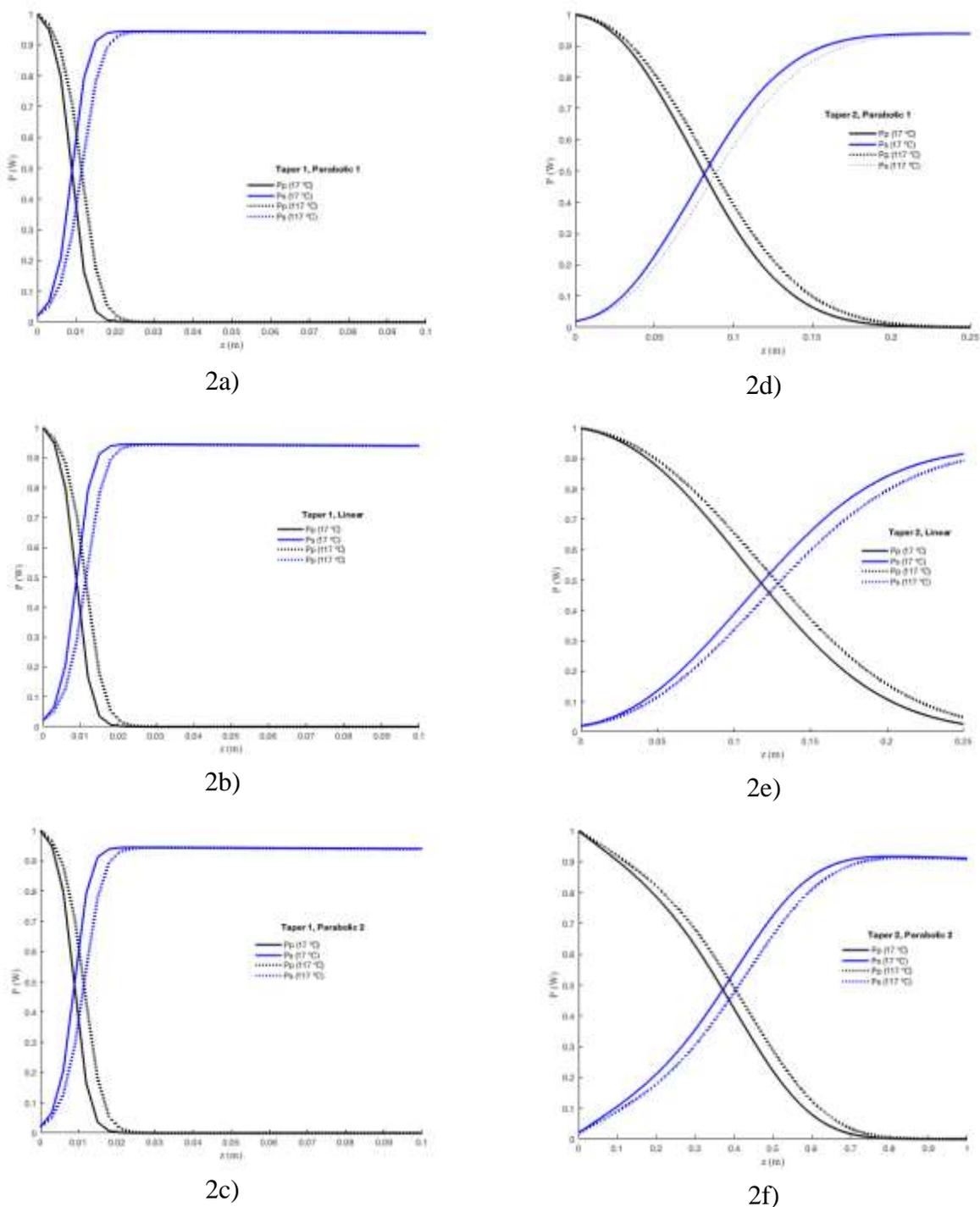
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en ambos dopados (Yb y Th) son similares para el sensado de temperatura, sin embargo, aunque el comportamiento es similar los resultados son diferentes. Es decir, la evolución de la potencia del bombeo y de la señal en el punto de intersección se presenta a distancias más cortas en la fibra, la eficiencia de conversión es mayor, y el comportamiento de la sensibilidad a diferentes temperaturas en función de la potencia de bombeo muestra una mayor respuesta para el amplificador dopado con Tulio.

A continuación, mostramos los resultados para el dopado con Holmio:

En la figura 8 podemos observar la conversión de potencia entre la radiación de bombeo y la señal a lo largo de la fibra dopada y adelgazada usando dos tipos de Tapers. Se puede observar que la máxima conversión de potencia (puntos de intersección) se encuentra a diferentes longitudes para ambos Tapers. El punto de intersección en los perfiles a), b), y c), que corresponde al Taper 1, ocurre siempre a longitudes más cortas de la fibra (0.01m aproximadamente) comparado a lo obtenido en el Taper 2 (el cual ocurre entre 0.1m y 0.4 m aproximadamente). Esta diferencia de una orden de magnitud entre ambos Tapers se observa solamente en un amplificador de fibra dopada con Holmio, para los otros dopados la diferencia de longitudes en los puntos de intersección son despreciables en ambos Tapers.

Figura 8 Amplificador dopado con Ho. Evolución de la potencia de bombeo y señal a dos temperaturas, potencia de bombeo a 1 W y diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo activo, a), b) y c) Taper 1; d), e) y f) Taper 2

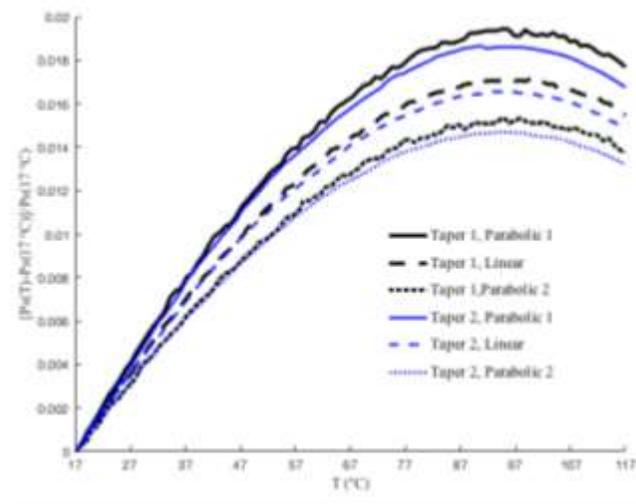


Fuente: Elaboración Propia

En la misma Figura 8 d), e) y f) para el Taper 2, se puede observar que la longitud en el punto de intersección depende fuertemente de los perfiles de adelgazamiento, variando entre 0.1m y 0.4m. Por otro lado, en el Taper 1 el punto de intersección en los perfiles a), b), y c) varía alrededor de 0.01m. Por lo que sugerimos que un amplificador de fibra dopado con Holmio se puede implementar con longitudes de fibras más cortas usando el esquema del Taper 1, mostrando además una conversión de potencia más estable para diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo. También se puede observar como la temperatura afecta la conversión de potencia entre la radiación del bombeo y la señal. En particular, la longitud de la fibra donde ocurre los puntos de intersección incrementa conforme incrementa la temperatura. La dependencia con la temperatura es muy similar en ambos Tapers. Para todos los perfiles de adelgazamiento, la desviación de la longitud de los puntos de intersección cuando la temperatura incrementa de 17 °C a 87 °C es más grande que el obtenido cuando la temperatura incrementa de 87 °C a 117 °C. Se puede observar una saturación a temperaturas mayores a 87 °C.

Se puede analizar la sensibilidad a los cambios de temperatura con la misma expresión usada anteriormente: $\Delta = [P_s(17\text{ °C}) - P_s(T)] / P_s(17\text{ °C})$. Se puede calcular para cada perfil de adelgazamiento de cada Taper con una longitud de fibra = 1 m, una potencia de bombeo = 1W, y una potencia de señal = 10mW. Los resultados se muestran en la figura 9.

Figura 9 Sensibilidad en Ho a diferentes Temperaturas para los Tapers 1 y 2, con diferentes perfiles de adelgazamiento con L=1 m



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 9, todos los casos muestran un incremento constante de la sensibilidad con respecto a la temperatura en el rango de 17° a 77 °C, todas las curvas presentan un perfil lineal donde las pendientes indican la sensibilidad de la señal amplificada con respecto a la temperatura para los diferentes perfiles de adelgazamiento de ambos Tapers. Se puede identificar una curva con la máxima pendiente positiva ($+2.5 \times 10^{-4} / \text{°C}$) que corresponde al caso del Taper 1 con perfil de adelgazamiento parabólico 1 (línea negra).

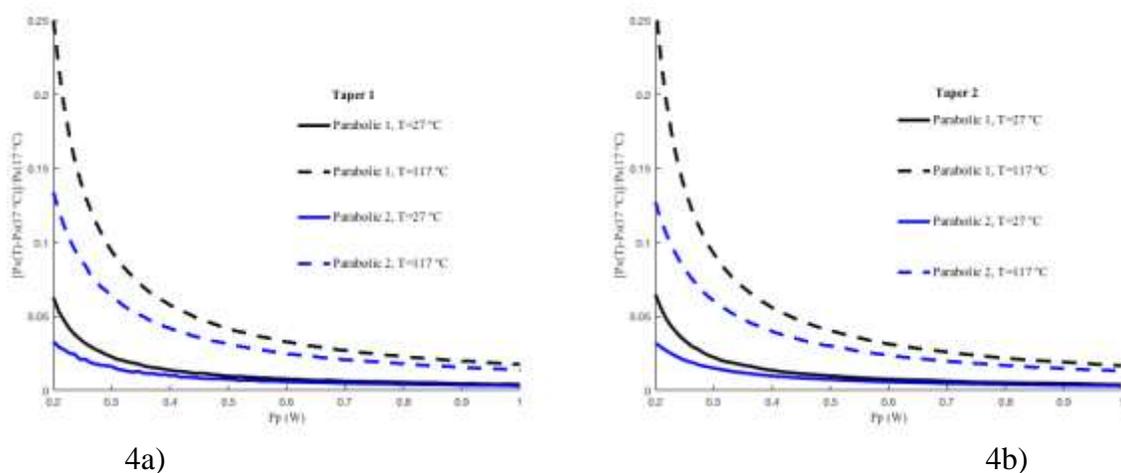
Por otro lado, en la misma Figura 9, se puede observar que todas las curvas alcanzan la saturación de la sensibilidad alrededor de 87 °C. Si comparamos estos resultados con los otros dopados (Iterbio y Tulio) podemos observar que son muy similares, sin embargo, para las fibras dopadas con Holmio hay más saturación en las curvas.

Para los láseres de fibra conviene tener una sensibilidad a la temperatura reducida para alcanzar una operación más estable, en este caso el uso del Taper 2 con un perfil de adelgazamiento parabólico 3 para el rango de temperatura entre 77-107 °C sería lo más recomendado. Por otro lado, para el uso como sensor de temperatura por fibra, es deseable tener alta respuesta a la temperatura, por lo que el uso de un esquema de Taper 1 con un perfil parabólico 1 en el rango de temperatura de 17-77 °C sería el recomendado.

La respuesta a la temperatura mostrada en la figura 9 para una longitud de fibra de 1m se puede mejorar a longitudes más cortas. En acuerdo a la figura 8, el mayor cambio en la señal amplificada con respecto a la temperatura ocurre aproximadamente a 0.01m para el esquema del Taper 1, y alrededor de 0.1m para el Taper 2.

La figura 10 muestra cómo evoluciona la sensibilidad con respecto a la potencia de bombeo inicial para ambos Tapers analizados, usando las temperaturas de 27 °C y 117 °C. Se puede observar que la sensibilidad crece a valores bajos de potencia de bombeo inicial, de la misma manera que los otros tipos de dopados. El comportamiento es similar para los diferentes Tapers. Estos son resultados importantes para el diseño de láseres y sensores de temperatura con fibra óptica dopadas.

Figura 10 Comportamiento de la sensibilidad en Ho variando la potencia de bombeo de 0.2 a 1 W a dos temperaturas $T=27$ y 117 °C, para diferentes perfiles de Tapers



Fuente: Elaboración Propia

En acuerdo a la figura 10, la sensibilidad en ambos Tapers se puede incrementar 10 veces si empleamos potencias de bombeo menores a 300 mW. Este incremento en la sensibilidad depende altamente del perfil de adelgazamiento utilizado.

Podemos comentar también que la longitud de la fibra determina la dimensión del sensor, en este contexto podemos decir que los amplificadores de fibra dopados con Ho son más pequeños que los otros amplificadores dopados con otras tierras raras. Por lo tanto, los amplificadores de fibra dopados con Ho, pueden ofrecer una oportunidad de ofrecer sensores de temperatura con fibra óptica más compactos. En este sentido se necesitaría un fuerte análisis de optimización incluyendo otras variables en el sistema.

4. Conclusiones

Se ha realizado un análisis numérico detallado sobre el comportamiento de los amplificadores de fibra dopado con tierras raras, en particular el Iterbio, Tulio y Holmio; con respecto a la variación de la temperatura. Se utilizaron fibras adelgazadas denominadas Tapers con diferentes perfiles de adelgazamiento. Se encontró que dependiendo el perfil de adelgazamiento del Taper y la potencia de bombeo inicial se modifica significativamente la sensibilidad a la temperatura. La sensibilidad es más alta conforme se reduce el radio del núcleo en la dirección de propagación (Taper 1) y se maximiza si la longitud de la fibra es igual a la distancia del punto de intersección donde se obtiene la conversión de potencia. Por otro lado, la sensibilidad en la temperatura se puede incrementar si usamos potencias de bombeo más bajas en la entrada del amplificador, por lo que en aplicaciones de sensado de temperatura es recomendable trabajar en un régimen de baja potencia de bombeo.

El amplificador de fibra dopado con Holmio se puede usar para desarrollar sensores de temperatura más compacto en comparación con los otros dopados de tierras raras. Los resultados proporcionan información importante para el desarrollo de láseres y sensores de fibra dopadas.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la UNACAR y la UNAM por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Los autores declaramos que no hay conflicto de interés acerca de la publicación de este artículo.

6. Referencias

- Agger SD, P. J. (2006). Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers. *Optics Express*, 50-57.
- Alvarez-Chavez JA, P.-S. G.-H.-R. (2013). Temperature sensing characteristics of tapered Yb-doped fiber amplifiers. *Optik*, 5818-5821.
- Amini S, K. P. (2017). Application of fiber-optic temperature data analysis in hydraulic fracturing evaluation. *Society of Exploration Geophysicists* (págs. 2105-2115). Austin, Texas: American Association of Petroleum.
- Castrellon-Uribe J, G.-T. G. (2010). Remote temperature sensor based on the up-conversion fluorescent power ratio of an erbium-doped silica fiber pumped at 975 nm. *Fiber and Integrated Optics*, 272-283.
- E. Ji, Y. S. (2017). Spectra-and temperature-dependent dynamics of directly end-pumped holmium lasers. *Applied Physics B*, 123-129.
- Ghatak A, T. K. (1998). *An introduction to fiber optics*. Cambridge University Press, 576.
- Ji Y, S. M. (2013). Spectroscopic analysis of efficient laser material. *Optical Materials Express Vol 3*.
- Li L, L. Q. (2008). High power single transverse mode operation of tapered large-mode-area fiber laser. *Optics Communication*, 655-657.
- Sanchez-Lara R, C. -H.-A.-P.-C. (2017). Temperature sensing characteristics of tapered Tm³⁺ doped fiber amplifiers. *Laser Physics*, 27(8):085108.
- Sukkar K, M. S. (2017). Temperature sensing for petroleum pipelines monitoring and control using fiber optics. *3rd International Scientific Conference New Trends in Information*. Baghdad.
- Trpkovski S, W. S. (2005). Er³⁺:Yb³⁺-doped fibre with embedded FBG for simultaneous measurement of temperature and longitudinal strain. *Measurement Science and Technology*, 12(2).
- Turri G, S. V. (2008). Temperature-dependent spectroscopic properties of Tm³⁺ in germanate, silica, and phosphate glasses. *Journal of Applied Physics*, 103(9):093104.
- Vazquez-Zuniga LA, C. S. (2010). Thermal characteristics of an ytterbium-doped fiber amplifier operating at 1060 and 1080 nm. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49(2R):022502.
- Zhang YJ, Z. F. (2011). Top-Hat beam Tm³⁺ doped fiber using an intracavity abrupt taper. *Laser Physics*, 215-218.
- Zhu S, X. J. (2011). Temperature sensor based on a single- mode tapered optical fiber. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 49(2R):022502.