



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.**

“REJILLAS GRABADAS EN FIBRA ÓPTICA CON LÁSER DE CO₂: APLICACIONES A SENSORES Y LÁSERES”



Tesis que para obtener el grado de Doctora en Ciencias (Óptica)

Presenta: M. en C. Teresa Elena Pórraz Culebro

Director de Tesis: Dr. Alejandro Martínez Ríos

León Guanajuato México

Enero de 2023

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través de la beca. Al Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., por permitirme formar parte de la institución y realizar el Doctorado.

A mi director de tesis; Dr. Alejandro Martínez Rios, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, enseñarme cómo trabajar y tenerme paciencia al hacer las cosas, así como todo el apoyo que me brindó a lo largo del Doctorado. Al Dr. Daniel Toral Acosta, por enseñarme a trabajar con los equipos en el laboratorio y explicarme como hacer las cosas. A mis compañeros de laboratorio por su apoyo y comprensión.

A mis padres; por su apoyo incondicional y confianza puesta en mí, por enseñarme que cuando uno se esfuerza puede conseguir lo que se propone. A mi esposo; por apoyarme en todo momento y ayudarme siempre que lo necesitaba. A mi hijo; por motivarme para hacer las cosas.

A todos los que me apoyaron a lo largo de estos años para que este sueño fuese posible, por todos los consejos y enseñanzas.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
LISTA DE FIGURAS	5
OBJETIVOS.....	9
a. Objetivo General.....	9
b. Objetivos Particulares.....	9
RESUMEN	10
I. INTRODUCCIÓN	12
I.1 Rejillas de Periodo Largo.....	12
I.2 Principio de operación de las RPL	13
I.3 Pre-post tratamiento térmico	17
II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	20
II.1 Fabricación de RPL y sus propiedades de transmisión.....	20
II.2 Pre-post tratamiento térmico en RPL.....	29
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
III.1 Caracterización	32
III.1.1 Temperatura.....	32
III.1.2 Curvatura	35
III.1.3 Tensión	38
III.2 Aplicación a sensado de soluciones líquidas	39
III.3 Perfil y sección transversal de la fibra.....	42
III.4 Mediciones de índice de refracción	44
III.5 Pre-post tratamiento térmico en RPL	47
III.5.1 RPL con fibra SMF-28	51

III.5.2 RPL con fibra 980-HP.....	54
III.5.3 RPL con fibra 1060-XP.....	59
III.5.4 Análisis.....	65
IV. CONCLUSIONES.....	67
V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
ANEXO A.....	73
ANEXO B.....	75
ANEXO C.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema idealizado de una RPL.

Figura 2. Esquema de la forma real de la RPL y vista cercana de la zona adelgazada en cada período de la RPL que muestra la expansión del núcleo a lo largo del adelgazamiento.

Figura 3. Esquema de configuración para la fabricación de RPL.

Figura 4. Diagrama de flujo de los pasos que se implementan en las funciones especiales de la LZM-100 para la fabricación de RPL.

Figura 5. Evolución del espectro de transmisión a medida que aumenta el número de periodos. A la izquierda se muestra el número de períodos y la respectiva profundidad del pico.

Figura 6. Gráfica de la Longitud de onda de resonancia (nm) vs. El período de la RPL (μm). Los símbolos corresponden a los picos en los datos experimentales (RPL de $580 \mu\text{m}$ a $700 \mu\text{m}$) con un total de 60 períodos cada uno, excepto la RPL de $700 \mu\text{m}$ con un total de 58 períodos. Las líneas continuas son las curvas de resonancia obtenidas mediante el uso de la Ecuación 1.

Figura 7. Las imágenes Simulados (a y b) muestran los patrones de modo transversal simulados de los modos 5 y 6 para una RPL con un período de $700 \mu\text{m}$ ((a) y (b) etiquetados en la gráfica de la Figura 6, respectivamente). Las imágenes Experimentales (c y d) muestran los patrones experimentales de modo transversal de las RPL con un período de $600 \mu\text{m}$ y $700 \mu\text{m}$ ((c) y (d) etiquetados en la gráfica de la Figura 6, respectivamente).

Figura 8. Transmisión de las RPL, con el número de periodos necesarios para obtener las profundidades máximas.

Figura 9. Diagrama de flujo de los pasos implementados en las funciones especiales para la fabricación de RPL y el pre-post tratamiento térmico.

Figura 10. Arreglo utilizado para la caracterización de temperatura.

Figura 11. Espectros de transmisión con las diferentes mediciones de Temperatura.

Figura 12. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la temperatura.

Figura 13. Arreglo utilizado para la caracterización de curvatura.

Figura 14. Mediciones en la longitud de onda de resonancia y profundidad en función de la curvatura.

Figura 15. Arreglo utilizado para la caracterización de tensión.

Figura 16. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la Micro-tensión.

Figura 17. Arreglo utilizado para la caracterización de índice de refracción y soluciones de hidrocarburos.

Figura 18. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la proporción de glicerina en agua destilada en %.

Figura 19. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la proporción de gasolina en alcohol.

Figura 20. (a) Perfil de la sección adelgazada de cada periodo de la RPL; (b) y (c) muestran las dimensiones del revestimiento y el núcleo en la sección sin adelgazar (sin procesar) del periodo de la RPL; (d) y (e) muestran las dimensiones transversales del revestimiento y el núcleo en la cintura adelgazada (después de tres minutos en solución de ácido fluorhídrico).

Figura 21. Espectros de transmisión simulados para diferentes índices de refracción externos.

Figura 22. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (gráfica de arriba) correspondiente a la RPL 1. La gráfica de abajo muestra el espectro de transmisión medido con cuatro índices de refracción externos diferentes.

Figura 23. Mediciones en la longitud de onda de resonancia (arriba) y la profundidad del pico (abajo), en función del índice de refracción externo (ERI), que corresponde a las RPL 2 y 3, respectivamente.

Figura 24. Mediciones con las diferentes potencias, los espectros de color negro corresponden a las RPL sin aplicar el post calentamiento y los espectros de color rojo corresponden a las RPL con el post calentamiento.

Figura 25. RPL en fibra SMF-28 con 500 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Figura 26. RPL en fibra SMF-28 con 600 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Figura 27. RPL en fibra SMF-28 con 650 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Figura 28. RPL en fibra SMF-28 con 700 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Figura 29. RPL en fibra 980-HP con 300 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 30. RPL en fibra 980-HP con 400 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 31. RPL en fibra 980-HP con 500 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 32. RPL en fibra 980-HP con 600 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 33. RPL en fibra 980-HP con 700 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 34. RPL en fibra 1060-XP con 300 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 35. RPL en fibra 1060-XP con 400 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 36. RPL en fibra 1060-XP con 500 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras),

con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 37. RPL en fibra 1060-XP con 600 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 38. RPL en fibra 1060-XP con 700 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Figura 39. Mediciones de temperatura (temperatura ambiente a 900 °C) en una RPL de 600 μm con 52 periodos, grabada en fibra 1060-XP, con tratamiento térmico al inicio y al final.

OBJETIVOS

a. Objetivo General

Fabricar rejillas de periodo largo en fibra óptica grabadas por un láser de CO₂, usando un sistema de procesamiento de vidrio.

b. Objetivos Particulares

- i. Fabricar rejillas de periodo largo sobre fibra estándar pasiva.
- ii. Implementar un sensor de alta temperatura.
- iii. Divulgar los conocimientos y desarrollos generados.
- iv. Publicar un artículo sobre la grabación de rejillas de periodo largo en fibra estándar pasiva
- v. Publicar un artículo de investigación sobre un sensor de alta temperatura.

RESUMEN

En este proyecto se propuso el desarrollo de Rejillas de Periodo Largo (RPL) en Fibra Óptica usando como fuente de calor para su fabricación un láser de CO₂ con una longitud de onda 10.6 μm. En particular, se desarrolló la metodología para la inscripción de las llamadas RPL en fibras ópticas. Las RPL son sensibles a perturbaciones externas, particularmente de origen mecánico, químico, biológico y térmico. La respuesta o el cambio inducido por estas perturbaciones externas dependen del método y los parámetros de fabricación. En el caso de las RPL fabricadas con láser de CO₂ tienen la particularidad de soportar altas temperaturas, lo cual las convierte en una excelente alternativa para el desarrollo de sensores de alta temperatura.

Las RPL grabadas con láser de CO₂ forman parte de una categoría de rejillas donde se utiliza una fuente de calor para modificar una sección micrométrica de la fibra, que al ser sometida a calentamiento resulta en la modificación en sus propiedades materiales, particularmente aquellas que determinan las propiedades de guiado de luz (el índice de refracción). La modificación del índice de refracción mediante calor (liberando o induciendo esfuerzos, deformando la sección de fibra, etc.) permite aplicar este tipo de técnica de grabado a casi cualquier tipo de fibra; a diferencia de las RPL grabadas con luz UV que requieren que las fibras tengan ciertas propiedades de fotosensibilidad tal que la irradiación con luz UV induce un cambio en el índice de refracción de la sección expuesta.

Para la fabricación de las rejillas de periodo largo se usó principalmente una procesadora de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL), desarrollando las rutinas de acuerdo a las características deseadas de las RPL. Las rutinas de la procesadora de vidrio permiten ajustar la energía calorífica aplicada (potencia del láser), la tensión o estado de esfuerzo durante el calentamiento, la separación entre puntos de calentamiento (el periodo) y el número total de periodos (longitud de la RPL), entre otros.

Este equipo permite calentar secciones relativamente largas de fibra, lo que da una capacidad adicional para ajustar las características de las rejillas, ya que el pre-calentamiento o post-calentamiento de la sección de fibra donde se graba la RPL afecta significativamente sus características. Se ha encontrado que el pre- o post-calentamiento ayuda a reducir la variabilidad

en las características espectrales de las RPL cuando éstas son fabricadas en diferentes estaciones del año bajo condiciones ambientales no controladas. Las fibras utilizadas para realizar los estudios descritos en este trabajo son fibras comerciales (980-HP, 1060-XP y SMF-28).

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Rejillas de Periodo Largo

Las Rejillas de Periodo Largo en fibra óptica (RPL) fabricadas con la técnica de irradiación con láser de CO₂ tienen características que las hacen adecuadas en muchas aplicaciones, particularmente por su estabilidad y que no es necesario que la fibra sea fotosensible. Con esta técnica, debido a la alta absorción del vidrio a la longitud de onda del láser de CO₂, se pueden fabricar RPL en casi cualquier tipo de fibra (Wang Y. , 2010) (Almeida, y otros, 2017). Debido al calor generado por la alta absorción, existe una modificación del índice de refracción debido a la liberación de esfuerzos, o en el caso particular del método de fabricación usado en este trabajo, hay una disminución del índice de refracción del núcleo y un aumento en el índice de refracción del recubrimiento (Porraz-Culebro, y otros, 2019) (Davis, y otros, 1998) (Hutsel & Gaylord, 2012) (Coelho, Silva, Nespereira, Abreu, & Rebordão, 2015) (Lai, Lim, Gunawardena, Lee, & Ahmad, 2017) (Coelho, Nespereira, Abreu, & Rebordão, 2013).

Otro punto muy importante de considerar es el equipo que se emplee para la fabricación de las RPL. Los primeros reportes utilizaban configuraciones de fabricación interna (Davis, y otros, 1998) que requieren un esfuerzo considerable, pero mediante el uso de sistemas modernos de procesamiento de vidrio, esto se podría evitar. Recientemente, se ha reportado sobre la fabricación automática inducida por arco (Yin, Tang, Liao, & Wang, 2016) y láser de CO₂ (Almeida, y otros, 2017) utilizando sistemas programables comerciales de procesamiento de vidrio. En los dos casos, las rutinas que ofrece el equipo permiten el diseño de las RPL.

Las variaciones en los parámetros de fabricación pueden afectar significativamente las características y la sensibilidad a las perturbaciones externas, incluso empleando la misma fuente de escritura de RPL.

En la referencia (Almeida, y otros, 2017), las RPL escritas con láser de CO₂ utilizan un procedimiento de fabricación que evita micro-adelgazamientos y la fibra se gira durante la escritura. Observaron que los modos de revestimiento tienen simetría circular, lo que quiere

decir que es simétrica la perturbación en el índice de refracción. Los autores afirman que esta simetría circular se debe a la rotación de la fibra durante la escritura de la RPL en la fibra. Sin embargo, el sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL) está diseñado para proporcionar una deposición de calor simétrica, que es fundamental para fabricar empalmes y adelgazamientos de alta calidad y bajas pérdidas. Esta deposición de calor simétrica significa que incluso sin rotación durante la fabricación de RPL e incluso con micro-adelgazamientos, se espera que los modos de revestimiento tengan simetría circular (Porraz-Culebro, y otros, 2019).

Es importante resaltar otro de los resultados presentados en la referencia (Almeida, y otros, 2017), es el hecho de que las RPL que fabricaron tienen períodos en el rango de 700 μm a 980 μm , así como, que no hay datos sobre la sensibilidad a parámetros externos como tensión, índice de refracción, curvatura y temperatura. Es muy probable que el valor de período de las RPL se deba a que el sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂ utilizado en (Almeida, y otros, 2017) no incluye la lente cilíndrica que puede reducir el tamaño del haz del láser de CO₂. Debido a que de ser utilizada la lente cilíndrica se podrían fabricar RPL con períodos más pequeños como 250 μm .

I.2 Principio de operación de las RPL

Como resultado de la fabricación de la rejilla en una sección determinada de fibra, se modifican las propiedades de guiado de luz a través de esa sección, lo cual a su vez conduce a cierta selectividad espectral. Las Figuras 1(A) a 1(E) muestran esquemáticamente el proceso de formación de una RPL fabricada con un láser de CO₂. Normalmente, la luz se propagará por la estructura de la fibra óptica a través del núcleo, el cual estará rodeado por un recubrimiento de vidrio y este a su vez por un revestimiento de plástico cuya función principal es proteger la fibra del ambiente exterior y también atenuar o eliminar la luz que no pase por el núcleo (fig. 1(A)). El primer paso para fabricar una RPL es remover a lo largo de una sección el revestimiento plástico donde será fabricada (fig. 1(B)). Generalmente, al remover el revestimiento no se afectan las propiedades de guiado de luz a través del núcleo de la fibra. Una

vez removido el revestimiento, se procede a aplicar el haz del láser de CO_2 en puntos separados por un periodo determinado a lo largo de la sección de fibra desnuda (sin revestimiento) de tal forma que la alta absorción de la luz provoca un calentamiento que cambia las propiedades de guiado en cada punto o periodo Λ (figs. 1(C) y 1(D)), en particular se induce un cambio en el índice de refracción. Como resultado, la sección compuesta de N periodos forma ahora una rejilla de longitud $L = N\Lambda$, y como resultado de esta perturbación se rompe la invariancia traslacional de la estructura de guiado resultando en la excitación de modos de propagación de luz de orden superior, los cuales de hecho son guiados por la guía formada por el recubrimiento y el medio exterior, aire en el caso ilustrado en la fig. 1(E). De hecho, el tipo de modo de orden superior excitado depende de la longitud de onda de la luz, resultando así en un dispositivo con selectividad espectral muy útil en diversas aplicaciones.

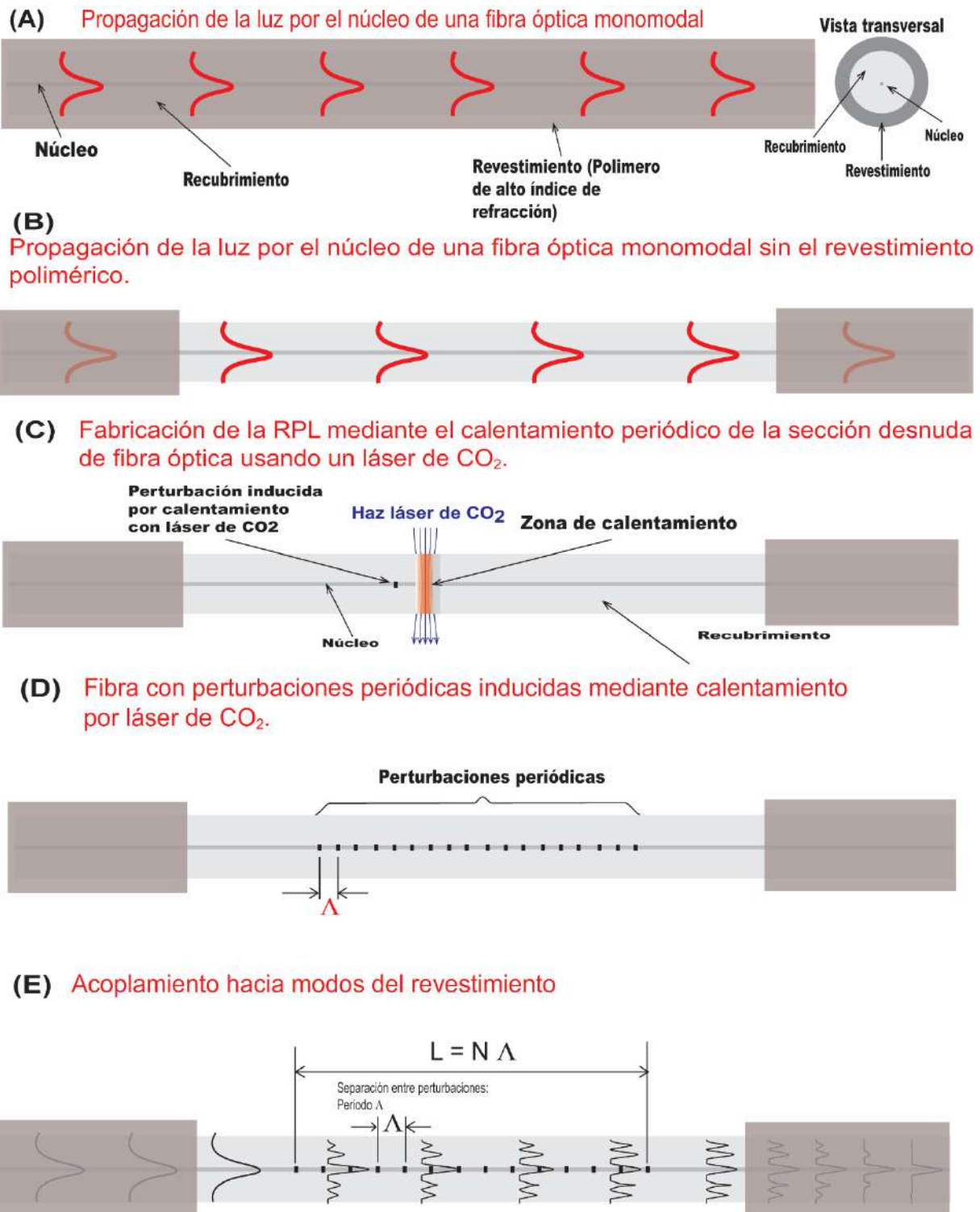


Figura 1. Esquema idealizado de una RPL.

Como se mencionó anteriormente, el efecto de fabricar la rejilla sobre una sección de fibra es el acoplamiento de energía del modo fundamental del núcleo hacia los modos del revestimiento, soportados por la guía de onda definida por el revestimiento y el medio externo, que generalmente es con un índice de refracción menor que el revestimiento. El grado o intensidad del acoplamiento del modo del núcleo hacia un modo particular del recubrimiento va a depender de la longitud de onda y se va a reflejar como picos o bandas de rechazo en el espectro de transmisión. Cada pico será el resultado del acoplamiento a un modo de recubrimiento específico.

En la ecuación 1 se muestra la condición de resonancia (Vengsarkar, y otros, 1996) que determina la longitud de onda central de un pico en particular:

$$\lambda_R = \Lambda \left(n_{ef}^{núcleo} - n_{ef}^{revestimiento(n)} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

donde λ_R es la longitud de onda de resonancia, $n_{ef}^{núcleo}$ y $n_{ef}^{revestimiento(n)}$ son índices efectivos del modo fundamental del núcleo y el modo de revestimiento n, respectivamente.

Un método que se emplea para identificar el modo de revestimiento asociado con un pico específico, se basa en la Ecuación (1); a partir de las curvas de dispersión calculadas de $n_{ef}^{núcleo}$ y $n_{ef}^{revestimiento(n)}$, graficando el periodo Λ vs longitud de onda de resonancia λ_R . Después, se comparan las longitudes de onda de resonancia experimentales con las curvas obtenidas de la Ecuación (1).

Dependiendo del método de fabricación de las RPL, el perfil de la perturbación periódica de la RPL podría llegar a desviarse del modelo idealizado que se observa en la Figura 1.

Para la fabricación de las RPL, la fibra se adelgaza periódicamente (Lu, Hsu, Jyu, & Lai, 2010), por lo que se vuelve difícil identificar los modos basándose en el modelo de la Ecuación 1. La fabricación de las RPL que presentamos cuenta con un calentamiento y un ligero adelgazamiento en cada período. En la Figura 2 se observa un esquema, donde las variaciones geométricas a lo largo de la fibra están exageradas, para mostrar así, la forma de la RPL fabricada con el sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂, y un acercamiento de la

zona adelgazada en cada período de la RPL que muestra la expansión del núcleo a lo largo del adelgazamiento.

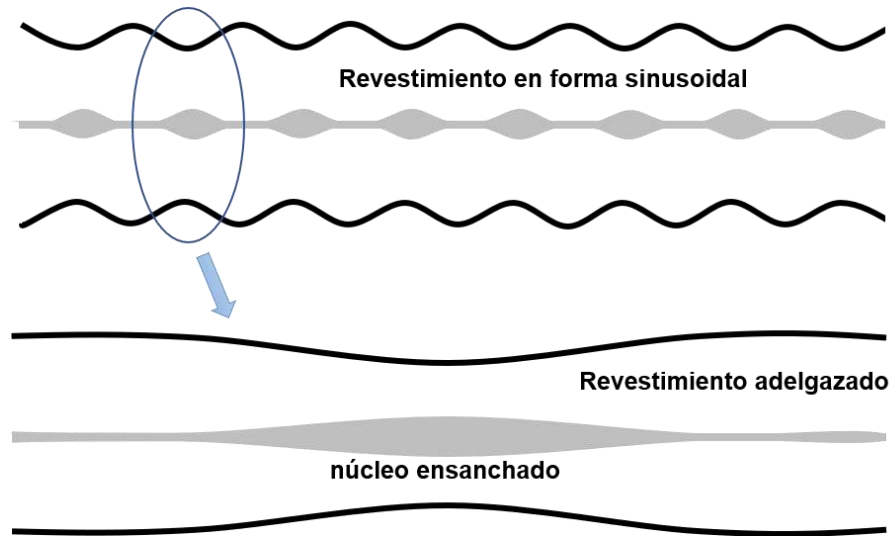


Figura 2. Esquema de la forma real de la RPL y vista cercana de la zona adelgazada en cada período de la RPL que muestra la expansión del núcleo a lo largo del adelgazamiento.

El proceso de adelgazamiento que se induce en el revestimiento de la fibra durante la fabricación da como resultado un perfil en forma sinusoidal, mientras que en el núcleo, por el efecto de difusión térmica producida también durante la fabricación, da como resultado un aumento del diámetro de la cintura del adelgazamiento de 1.64 veces. Lo que trae consigo una diferencia en la modificación de los índices efectivos de los modos del núcleo y del revestimiento, que causaría un problema en la aplicación directa del modelo de la Ecuación 1, en la identificación de los modos.

I.3 Pre-post tratamiento térmico

Cuando se escriben las RPL, la eficiencia de acoplamiento en la RPL podría mejorarse en gran medida mediante un pre o post tratamiento térmico (Xu, y otros, 2015), lo cual también

ayuda a estabilizar el espectro de la RPL (Humbert & Malki, 2002), debido a que cualquier esfuerzo residual se elimina o disminuye durante este tratamiento térmico (Humbert & Malki, 2002) (Zhu, y otros, 2005) mejorando así las características y repetibilidad de las estructuras de las RPL (Pospori, Marques, Bang, Webb , & Andre, 2017).

El equipo utilizado para la fabricación de RPL también es importante, el sistema láser de CO₂ (LZM-100 de AFL) está diseñado para proporcionar una deposición de calor simétrica, que es necesaria para empalmes y adelgazamientos de alta calidad y bajas pérdidas (Zheng, 2016) (Porraz-Culebro, y otros, 2019), esto es importante tanto para la fabricación de las RPL como para el pre o post tratamiento térmico.

En esta tesis, se presentan las características de las RPL escritas mediante el uso de un sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL) con la lente cilíndrica de enfoque. La rutina desarrollada para la fabricación de RPL estuvo diseñada para obtener rejillas con periodos que van desde 300 μm a 700 μm . Las RPL crecen con cada período que se estudia y la simetría de los modos excitados se determina experimentalmente. Se encontró que los modos de revestimiento excitados son de simetría circular.

Para caracterizar la respuesta a perturbaciones externas, se seleccionó una RPL con un periodo de 700 μm en fibra SMF-28, se midió la respuesta a tensión, curvatura, temperatura e índice de refracción externo, sensibilidad a soluciones de glicerina-agua destilada y gasolina-alcohol.

La RPL fue modelada mediante la implementación de un programa en el software Photon Design. El modelo tiene en cuenta la forma geométrica real de la sección micro-adelgazada que realiza la perturbación del índice, la forma geométrica real de la sección adelgazada se midió usando un microscopio SEM. El modelo también tiene en cuenta el cambio del índice de refracción en el núcleo y el revestimiento inducido por la irradiación con láser de CO₂ mediante el uso de datos experimentales publicados para la fibra de telecomunicaciones estándar SMF-28.

Se presenta la estabilización de longitudes de onda de resonancia en RPL mediante un pre-post tratamiento térmico utilizando un sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL) con lente cilíndrica de enfoque.

La rutina desarrollada es para un pre o post calentamiento y la fabricación de la RPL. Se trata de estabilizar la fibra para su fabricación y correcto grabado de las RPL, para mantener la posición de los picos de atenuación durante las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) y no verse afectados por condiciones atmosféricas como la humedad.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

II.1 Fabricación de RPL y sus propiedades de transmisión

El procedimiento que se utiliza para la fabricación de RPL es muy similar al que se describe en la Referencia (Zheng, 2016) (Porraz-Culebro, y otros, 2019), que explica a detalle el uso del sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂ LZM-100, para la fabricación de RPL. En la Figura 3 se observa el esquema de la configuración que se emplea para la fabricación de las RPL.

Para nuestro caso, todas las RPL se fabricaron utilizando la lente cilíndrica instalada, para reducir el tamaño de la región de calentamiento. Esta lente reduce el tamaño del punto del haz de 4.8 mm a menos de 1 mm (Zheng, 2016). El espectro de transmisión durante la fabricación de RPL se monitorea utilizando un Analizador de Espectro Óptico (OSA) Anritsu MS9740A, y la fuente de banda ancha incorporada se utiliza como fuente de luz de entrada.

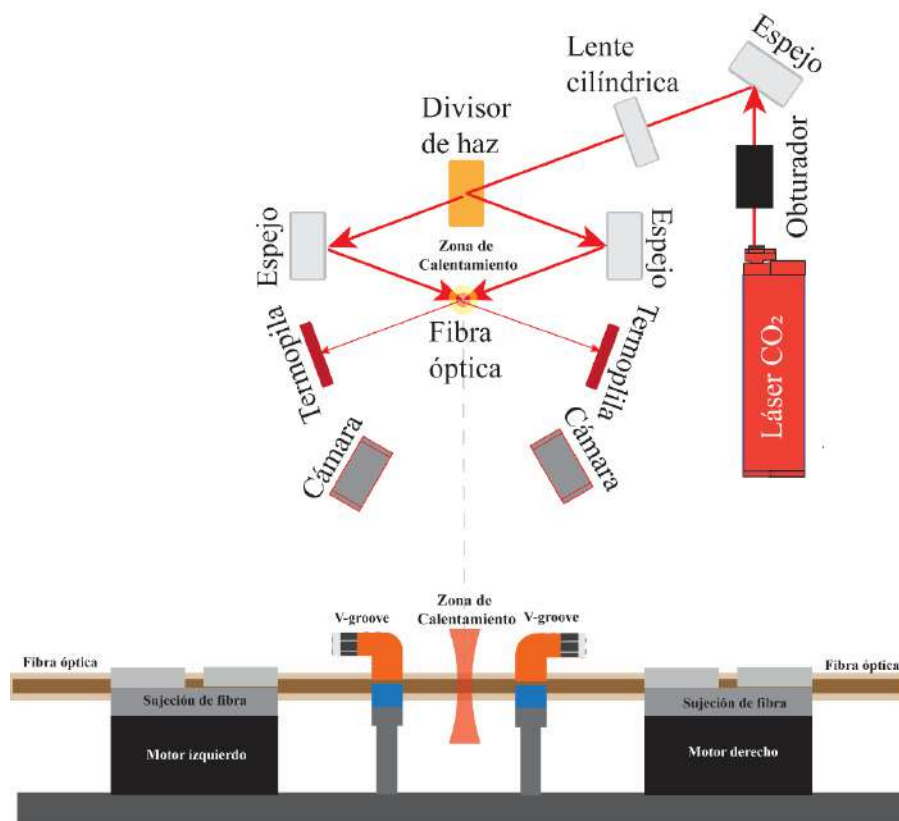


Figura 3. Esquema de configuración para la fabricación de RPL.

Utilizando las capacidades de las funciones especiales del sistema de procesamiento de vidrio LZM-100 (Zheng, 2016) se realiza la fabricación de las RPL. La Figura 4 muestra un diagrama de flujo de los pasos que se siguen para la fabricación de las RPL. Primero, se monta la sección de fibra desnuda en los soportes LZM-100, después, la sección de fibra desnuda se precalienta a 10 W por 120 ms, luego la fibra se estira 21 μm con el láser todavía encendido y a la misma potencia, realizando así el adelgazamiento que forma la perturbación. Después, con el láser apagado, la fibra se mueve a una nueva posición, de esta manera, ese desplazamiento corresponde a la longitud del periodo que se requiere, realizando previamente la compensación de la longitud que se estiró. Este proceso se repite hasta completar el número deseado de periodos.

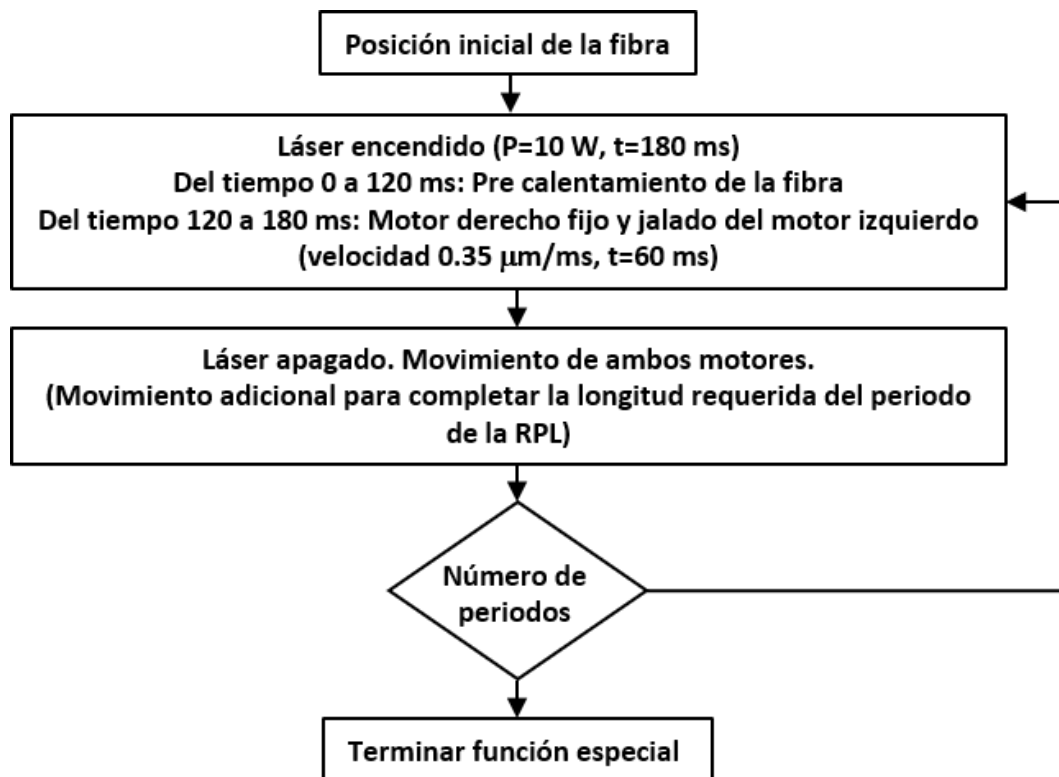


Figura 4. Diagrama de flujo de los pasos que se implementan en las funciones especiales de la LZM-100 para la fabricación de RPL.

Para que se pueda encontrar una receta adecuada que adapte la transmisión espectral a picos más profundos y de baja pérdida, para un periodo deseado de RPL, se utiliza el proceso de fabricación que ya se mencionó, y posteriormente, revisando el número acumulado de perturbaciones para encontrar el resultado aceptable.

Es importante mencionar que la cantidad de perturbaciones que se requieren depende de nuestras necesidades, es decir, profundidad máxima del pico, bandas de rechazo amplias o, ubicación de la longitud de onda, entre otras. Una vez que se encuentra la configuración de receta que se requiere, el programa de fabricación de la LZM-100 se puede configurar para grabar automáticamente el número completo de periodos para un diseño específico de RPL.

En la Figura 5 se puede observar la evolución en el espectro de transmisión a medida que aumenta el número de periodos de una RPL fabricada, empleando el método que se describió anteriormente. Para este caso, se utilizó una RPL de 680 μm y se estableció en 5 el número programado de períodos para monitorear la evolución del espectro. Como se puede ver, el pico más profundo alcanza su máximo en 1603 nm de longitud de onda con 50 periodos (23.23 dB de profundidad).

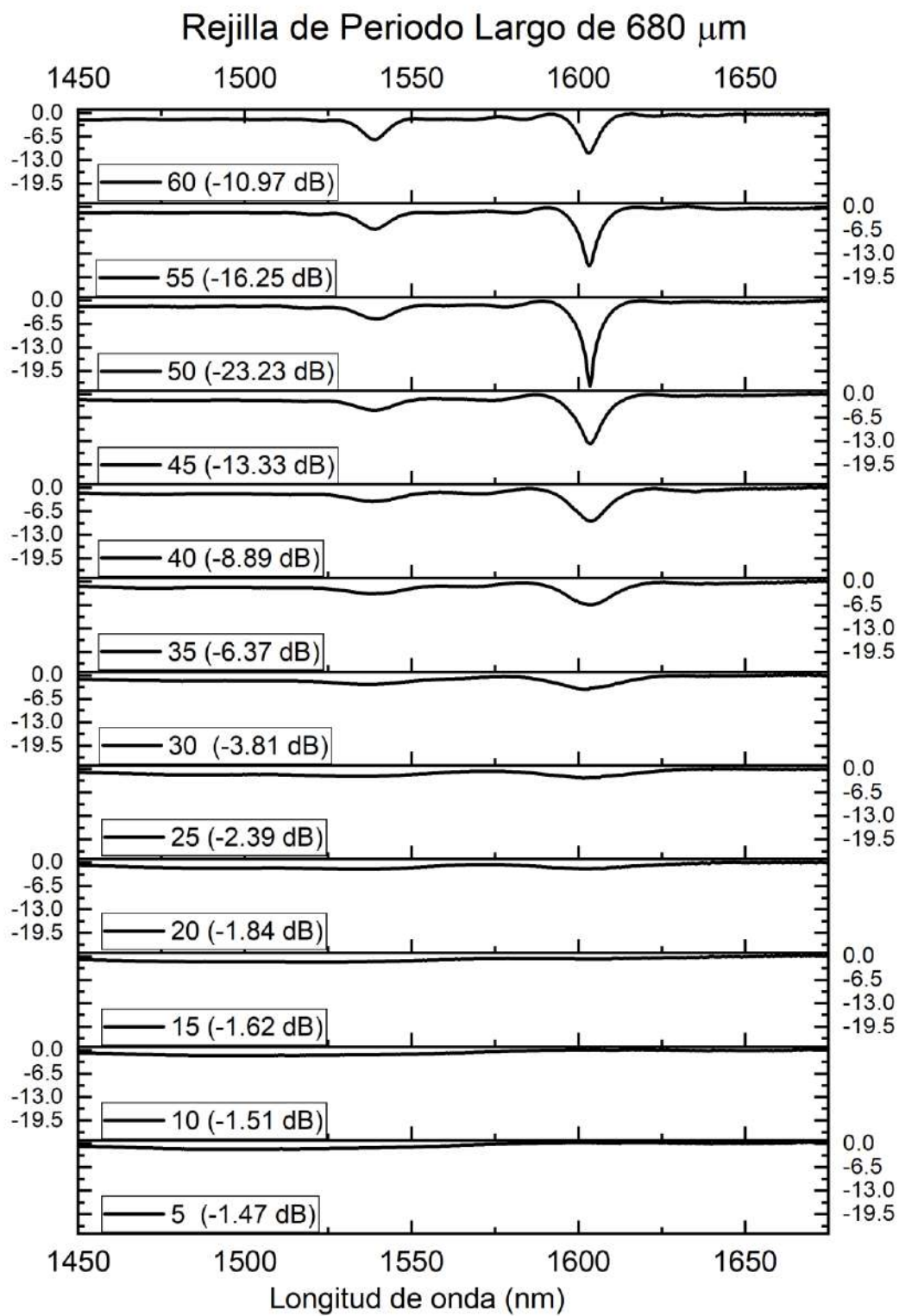


Figura 5. Evolución del espectro de transmisión a medida que aumenta el número de periodos. A la izquierda se muestra el número de periodos y la respectiva profundidad del pico.

La disminución del pico (en ~1600 nm) después de los 50 periodos, sucede por el efecto de sobresaturación, debido a que la transferencia de potencia óptica entre el modo del núcleo a cualquier modo de mayor orden varía con el $\cos^2(\kappa L)$, donde κ es el coeficiente de acoplamiento y L es la longitud de la RPL. El máximo acoplamiento o la máxima profundidad de atenuación se da para un valor de $\kappa L = \pi$, es decir, suponiendo que los 50 periodos corresponden al máximo acoplamiento, al añadir más periodos debe disminuir la profundidad.

Los modos resonantes del recubrimiento de las RPL, en general, no están completamente acoplados para tener una fuerte atenuación a la longitud de onda resonante. Esto se hace manteniendo la constante de acoplamiento muy cerca a π . La potencia del modo de recubrimiento gradualmente empieza a acoplarse de nuevo hacia el núcleo conforme κL excede π , y la atenuación en la longitud de onda resonante decrece gradualmente (Biswas, Basumallick, Dasgupta, Ghosh, & Bandyopadhyay, 2016).

La formación de otro pico (en ~1540 nm), sucede que la constante de acoplamiento para el periodo seleccionado y el modo particular que origina este pico es menor y requiere más periodos para comenzar a aparecer.

Es importante tener en cuenta que estas RPL fueron fabricadas el 11 de marzo de 2017, debido a que, en general se observa que las posiciones de los picos pueden verse afectadas por las condiciones ambientales al momento de la fabricación; principalmente la humedad. Por lo que puede requerirse más o menos periodos para alcanzar la profundidad deseada. Esto puede suceder debido a que, con las condiciones ambientales como la humedad, tiene una modificación en las propiedades mecánicas o la distribución de esfuerzos residuales debido a la absorción de agua (Bhaumik, 2017).

Como se describe más adelante, según la fecha de fabricación o las condiciones ambientales durante la fabricación, puede variar significativamente la respuesta a los cambios en el índice de refracción externo.

En la Figura 6 se muestra una gráfica de Longitud de onda de resonancia (nm) vs. El periodo de la RPL (μm). Los datos experimentales (símbolos) corresponden a los picos de

profundidades de las RPL con periodos que van desde 580 μm a 700 μm , con un total de 60 periodos, excepto la RPL de 700 μm con un total de 58 periodos. En cada símbolo, está indicada la profundidad del pico en la longitud de onda de resonancia.

Las líneas continuas fueron obtenidas mediante el uso de la Ecuación 1, utilizando los parámetros conocidos de la fibra estándar SMF-28 (diámetro de 8.3 μm en el núcleo y 0.14 NA), así como, teniendo en cuenta la dispersión del material. Los índices efectivos de los modos del núcleo y revestimiento que se necesitan en la Ecuación 1 para la generación de las curvas de la Figura 6 se calcularon con el software Photon Design, que utiliza un método escalar de diferencias finitas. En los cálculos, se modeló la estructura de la fibra como una guía de onda cilíndrica de tres capas, donde la capa exterior es aire. Las ligeras fluctuaciones que se observan en las líneas continuas son propias del software, por lo que es necesario optimizar los parámetros o usar una mayor resolución, lo que puede resultar en un proceso de cómputo muy excesivo, para nuestro propósito, los resultados obtenidos de la simulación cumplen con lo necesario.

Las imágenes etiquetadas como Simulados (a y b) de la Figura 7, que corresponde a los modos LP06 y LP05, respectivamente, muestran los patrones de intensidad obtenidos por la simulación con el software Photon Design. Las imágenes Experimentales (c y d) de la Figura 7, que corresponde a los puntos etiquetados como (c) y (d) en la figura 6, son los patrones de modo transversal medidos de las RPL con períodos de 600 μm y 700 μm . El símbolo (c) de la gráfica corresponde a una longitud de onda de resonancia de 1472 nm para una RPL con un período de 600 μm , el símbolo (d) corresponde a una longitud de onda de resonancia de 1589 nm para una RPL con un período de 700 μm .

Estas longitudes de onda de resonancia se encuentran en la misma región, es decir, entre las líneas correspondientes a los Modos 5 y 6, como se observa en la Figura 6, sus patrones de modos tienen un parecido cercano. Para la medición del patrón de modo transversal, se le hizo un corte a la RPL unos milímetros después del final del grabado de la rejilla, el otro extremo se acopló a una fuente de luz láser sintonizable estabilizada (Anritsu TunicsPlus). La luz de salida en el extremo cortado fue colimada con un microscopio de 40x y se proyectó en una cámara

CCD (Xenics XEVA XC-130). El número de anillos muestra una semejanza con un modo de revestimiento LP06.

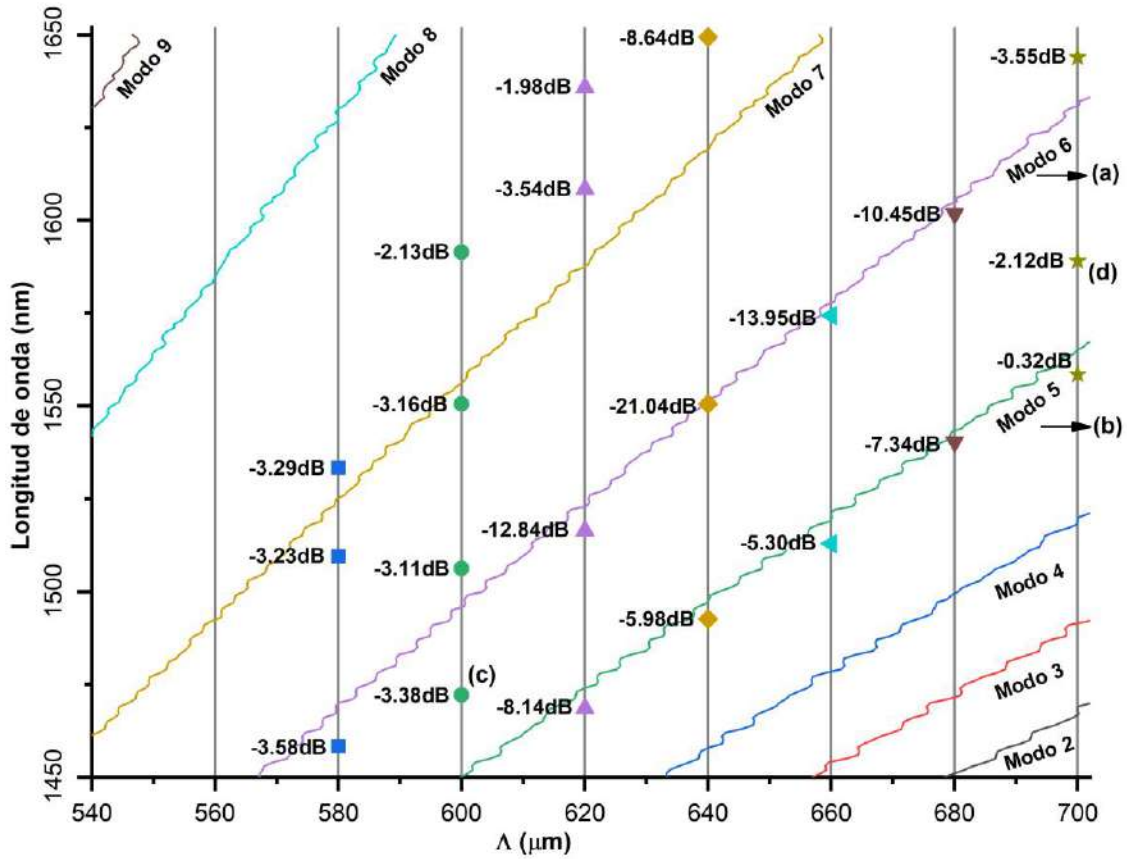


Figura 6. Gráfica de la Longitud de onda de resonancia (nm) vs. El período de la RPL (μm). Los símbolos corresponden a los picos en los datos experimentales (RPL de $580\ \mu\text{m}$ a $700\ \mu\text{m}$) con un total de 60 períodos cada uno, excepto la RPL de $700\ \mu\text{m}$ con un total de 58 períodos. Las líneas continuas son las curvas de resonancia obtenidas mediante el uso de la Ecuación 1.

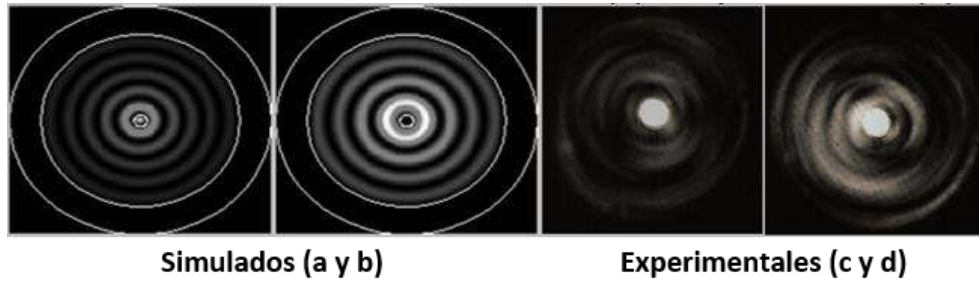


Figura 7. Las imágenes Simulados (a y b) muestran los patrones de modo transversal simulados de los modos 5 y 6 para una RPL con un período de $700\ \mu\text{m}$ ((a) y (b) etiquetados en la gráfica de la Figura 6, respectivamente). Las imágenes Experimentales (c y d) muestran los patrones experimentales de modo transversal de las RPL con un período de $600\ \mu\text{m}$ y $700\ \mu\text{m}$ ((c) y (d) etiquetados en la gráfica de la Figura 6, respectivamente).

Los símbolos que corresponden a los picos de profundidad en los datos experimentales que se observan en la Figura 6 no corresponden necesariamente a la profundidad máxima de la longitud de onda de resonancia de las RPL, pueden encontrarse en un número diferente de períodos.

Para poder conocer el número necesario de periodos para obtener las profundidades máximas del pico, se observa en la Figura 8 la transmisión de las RPL con el número de periodos necesarios para obtener las profundidades máximas.

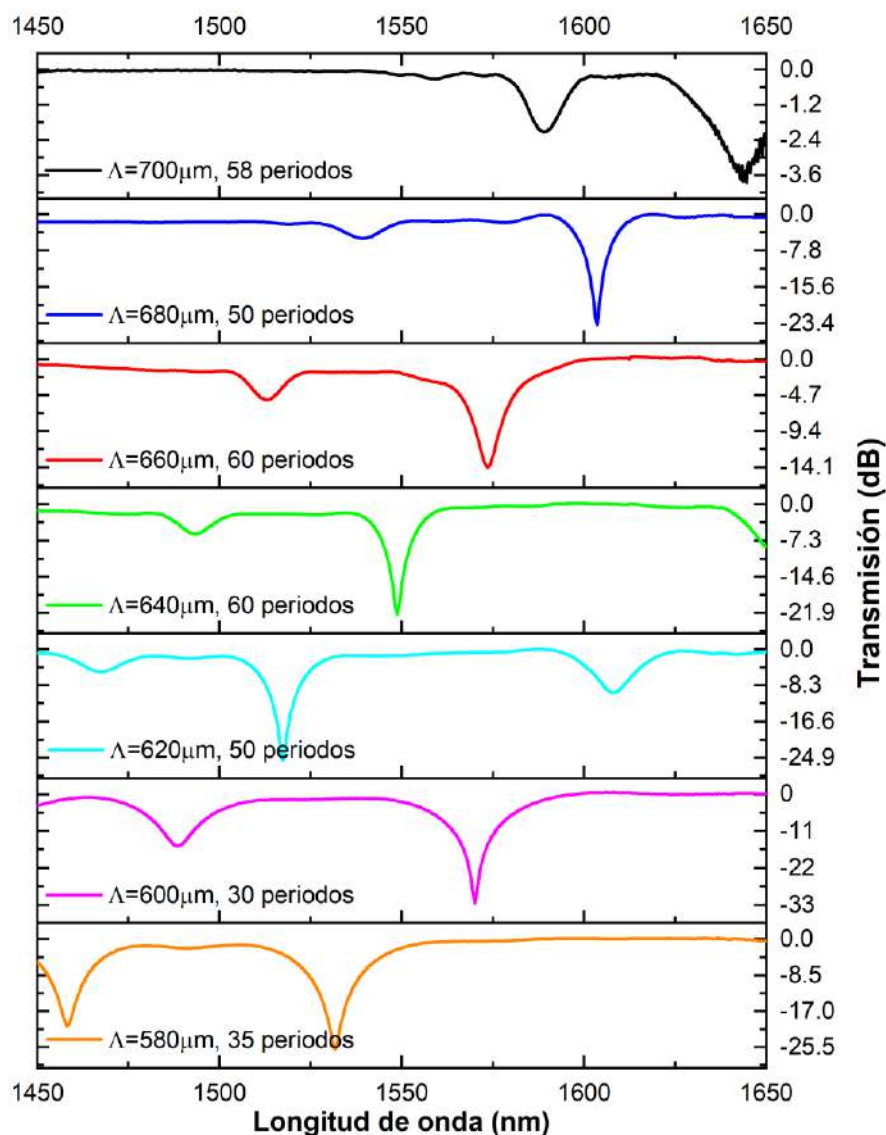


Figura 8. Transmisión de las RPL, con el número de periodos necesarios para obtener las profundidades máximas.

La profundidad y posición de las longitudes de onda de resonancia también se ven afectadas por las condiciones ambientales durante la fabricación de las RPL. Las RPL utilizadas para este trabajo fueron fabricadas en un período de más de un año, por lo que a veces incluso con el mismo período y parámetros de fabricación, la posición de los picos, sus respectivas profundidades e incluso la sensibilidad pueden variar significativamente.

II.2 Pre-post tratamiento térmico en RPL

Se planeó fabricar RPL en fibra 980-HP y 1060-XP, así como con fibra SMF-28, esto fue para realizar pruebas del comportamiento de las RPL al ser sometidas a un tratamiento térmico, estas pruebas se decidieron hacer en las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) para poder hacer una comparación completa.

Tanto la fabricación de las RPL como el pre-post tratamiento térmico se realizan de forma automatizada mediante el uso de las funciones especiales del sistema de procesamiento de vidrio LZM-100 de AFL (Zheng, 2016) (Porraz-Culebro, y otros, 2019), con la opción de lente cilíndrica instalada.

El espectro de transmisión de las RPL en fibra SMF-28 se monitorea usando un analizador de espectro óptico (OSA) YOKOGAWA AQ6370B, y como fuente de luz de entrada, la fuente de banda ancha incorporada en el analizador de espectro óptico Anritsu MS9740A (OSA).

El espectro de transmisión de las RPL en fibra 980-HP y 1060-XP se monitorea usando un analizador de espectro óptico (OSA) YOKOGAWA AQ6370B, y como fuente de luz de entrada, la fuente de luz blanca AQ4305 YOKOGAWA.

La Figura 9 muestra un diagrama de flujo de los pasos seguidos para la fabricación de RPL y el pre-post calentamiento. Primero, después de montar la sección de fibra desnuda en los soportes LZM-100, toda la sección de fibra desnuda se pre calienta a 2.42 W con una velocidad de 0.35 $\mu\text{m}/\text{ms}$ moviendo ambos motores, luego se regresa a la posición inicial de la fibra. Posteriormente, la sección de fibra se precalienta a 10 W por 120 ms, luego, mientras el motor derecho está fijo, el motor izquierdo avanza estirando la fibra durante 60 ms con el láser aún encendido y a la misma potencia. Luego, con el láser apagado, ambos motores mueven la fibra a una nueva posición, ese desplazamiento corresponde a la longitud del periodo que se requiere, previa compensación de la longitud estirada. Este proceso se repite hasta completar el número deseado de periodos. Finalmente, regresa a la posición inicial de la fibra para post calentar a

toda la sección de fibra desnuda a 2.42 W con una velocidad de 0.35 $\mu\text{m}/\text{ms}$ moviendo ambos motores.

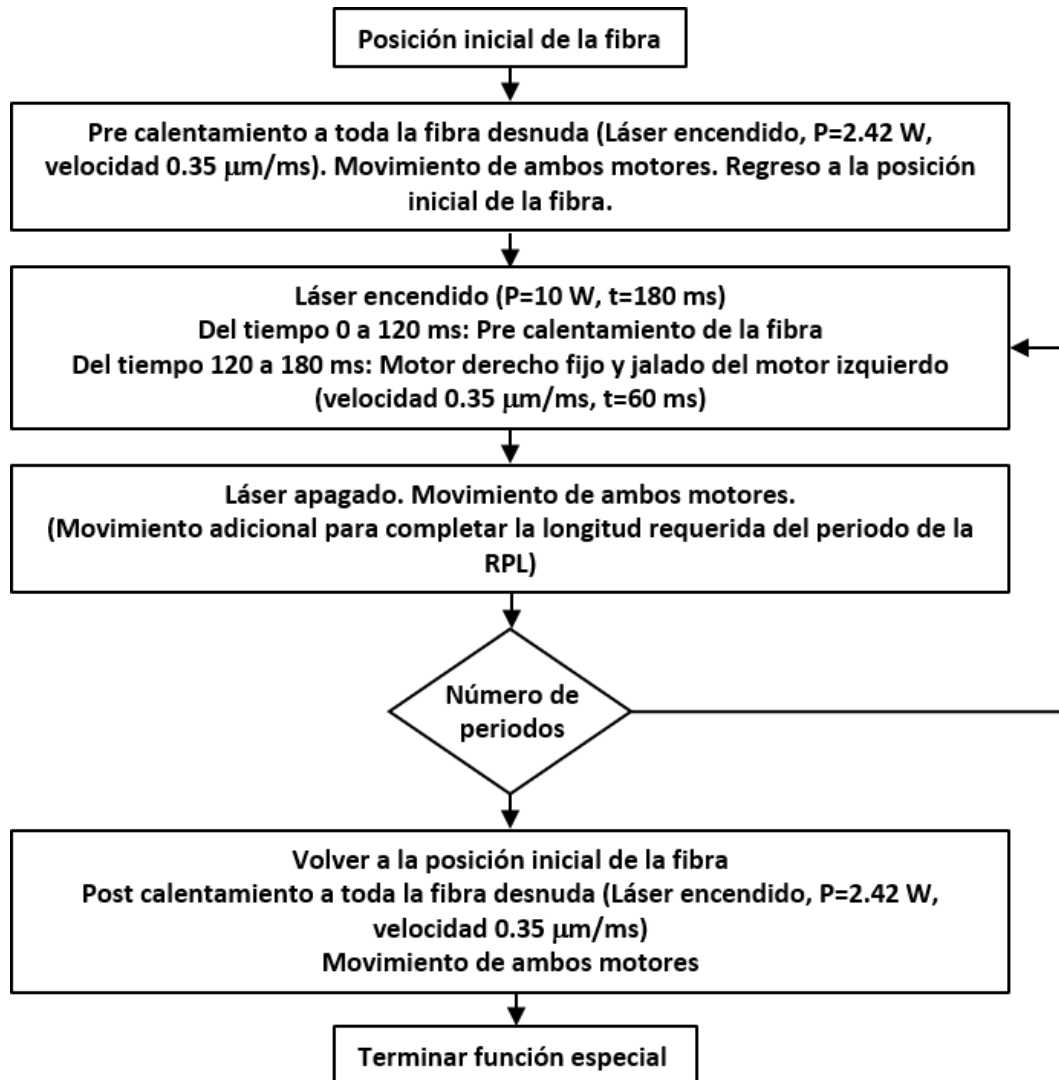


Figura 9. Diagrama de flujo de los pasos implementados en las funciones especiales para la fabricación de RPL y el pre-post tratamiento térmico.

La temperatura que alcanza la fibra durante el pre-post tratamiento térmico es de 484 °C aproximadamente, que corresponde a los 2.42 W de potencia. Se eligió este valor después de

hacer pruebas con diferentes valores de potencia, es decir, se partió de la potencia estándar de calibración de la procesadora de vidrio con láser de CO₂ LZM-100 de AFL (10 W aproximadamente), se le restaron 1.52, 3.03, 4.55, 6.06, 7.58 y 9.09 W respectivamente al valor estándar de calibración. A partir de esto, se obtuvo que la potencia óptima para la aplicación del tratamiento térmico es del estándar de calibración menos 7.58 W, lo que nos da una potencia resultante de 2.42 W, con la que no se altera el espectro o se borra la RPL. Más adelante, en los resultados, se observa con más detalle este análisis.

Para analizar los resultados se fabricaron RPL de 300, 400, 500, 600 y 700 μm en fibra 980-HP y 1060-XP, el rango de medición es de 850 a 1650 nm. Y RPL de 500, 600, 650 y 700 μm en fibra SMF-28, el rango de medición es de 1400 a 1650 nm.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

III.1 Caracterización

Es importante conocer el efecto de los estímulos externos en las RPL, para diversas aplicaciones prácticas como filtrado de longitud de onda, sensores, entre otros, puede ser para aprovechar el efecto para sintonizar la respuesta, o para suprimir en la medida de lo posible este efecto. Para evaluar la respuesta de las RPL a cambios en parámetros externos como temperatura, curvatura, tensión e índice de refracción externo, se realizaron diversas pruebas.

III.1.1 Temperatura

Uno de los parámetros más críticos que se debe conocer es la respuesta de la RPL a cambios de temperatura, que puede ser para utilizarla como un sensor de temperatura o para compensar ese efecto cuando va a ser utilizada para otros fines, debido a que cuando se usa para medir otro parámetro, la temperatura puede influir en la respuesta.

Para las pruebas de temperatura, se colocó la RPL en un canal de una placa de aluminio que está montada directamente sobre un calentador eléctrico, que controla la temperatura electrónicamente por un PID. En la Figura 10 se puede observar el arreglo utilizado.

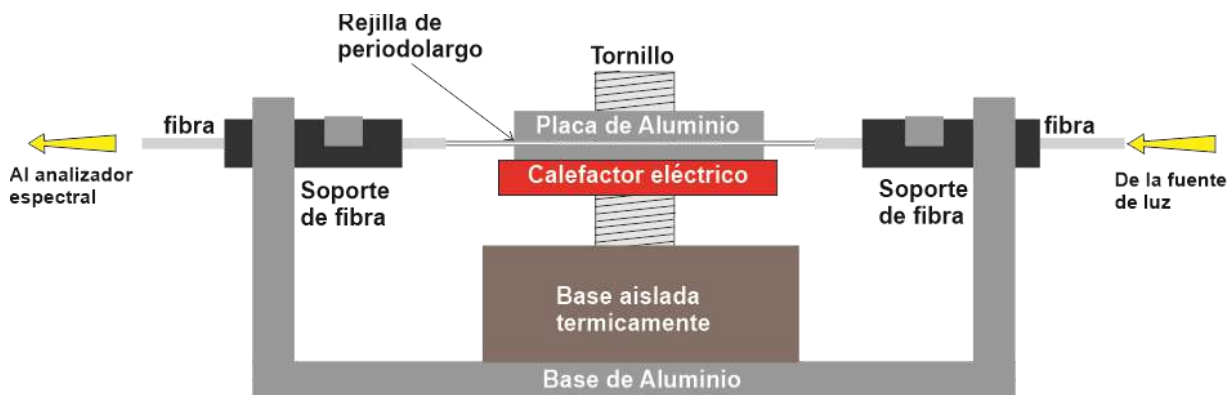


Figura 10. Arreglo utilizado para la caracterización de temperatura.

Las mediciones de temperatura se realizaron en un rango de 50°C a 425°C, antes de tomar las lecturas del OSA en cada medición de temperatura, se esperó 10 minutos para estar seguros de que la temperatura se mantenía estable, y el tiempo que tardaba en pasar de un valor de temperatura a otro fue de 2 minutos. En la Figura 11 se observan los espectros de transmisión de las diferentes mediciones de Temperatura.

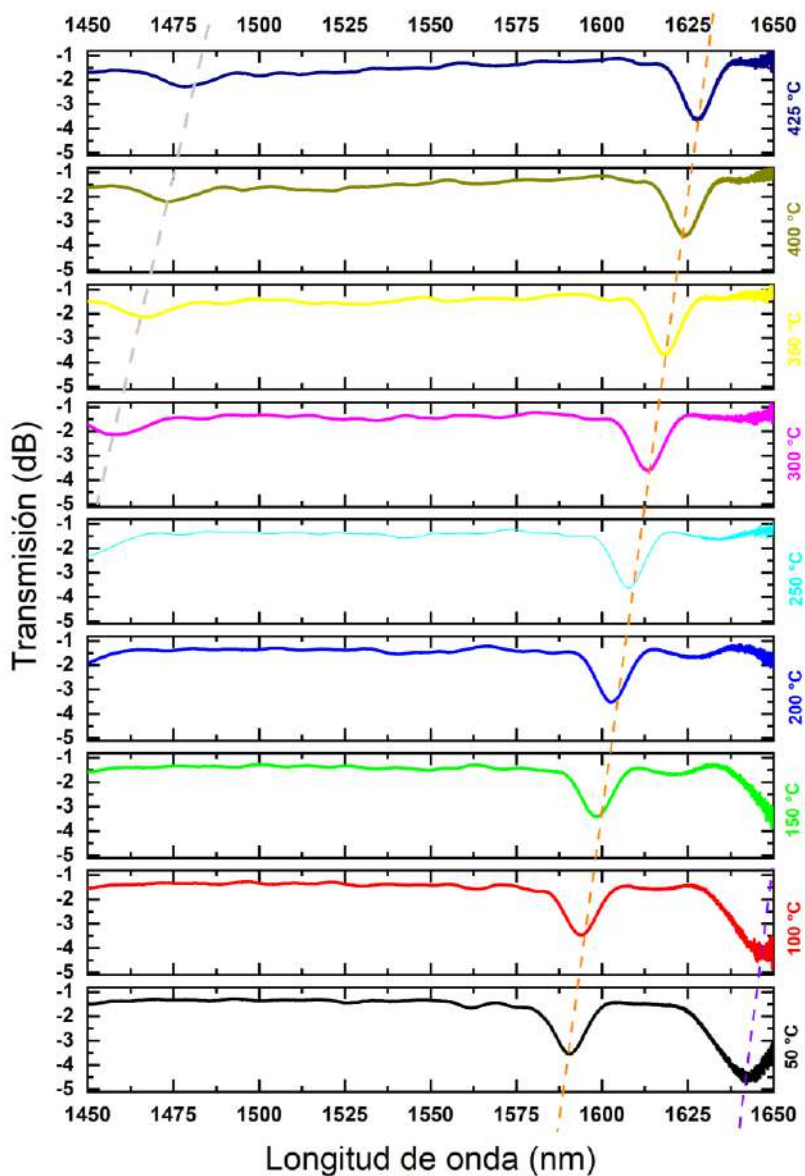


Figura 11. Espectros de transmisión con las diferentes mediciones de Temperatura.

En el rango de medición de temperatura de 50°C a 425°C, el segundo pico de izquierda a derecha, es el que muestra un desplazamiento más lineal como lo indica la línea roja punteada en la figura. Además, la variación en la profundidad del pico es de 0.25 dB, algo importante para una medición estable. También se puede observar en la figura que a partir de los 200°C se empieza a hacer notable, dentro de nuestro rango de medición, otra banda de atenuación. Dependiendo del equipo de medición disponible y de la fuente de excitación también disponible, así como, sus rangos de operación espectral, se debe seleccionar la banda de atenuación más adecuada para realizar la medición de la forma más conveniente.

A partir de las mediciones realizadas, se obtuvo una sensibilidad de 101.2 pm/°C (Figura 12). Esta sensibilidad se encuentra dentro del rango de los valores que han sido medidos y que han sido previamente publicados para un rango de alta temperatura (Huang,, Zhou, Zhang, Chen, & Xiao, 2010) (Bai, y otros, 2015). Para el caso de la atenuación, no se observa una variación considerada en la profundidad, debido que entre la máxima y mínima profundidad observada, hay una diferencia de 0.253 dB.

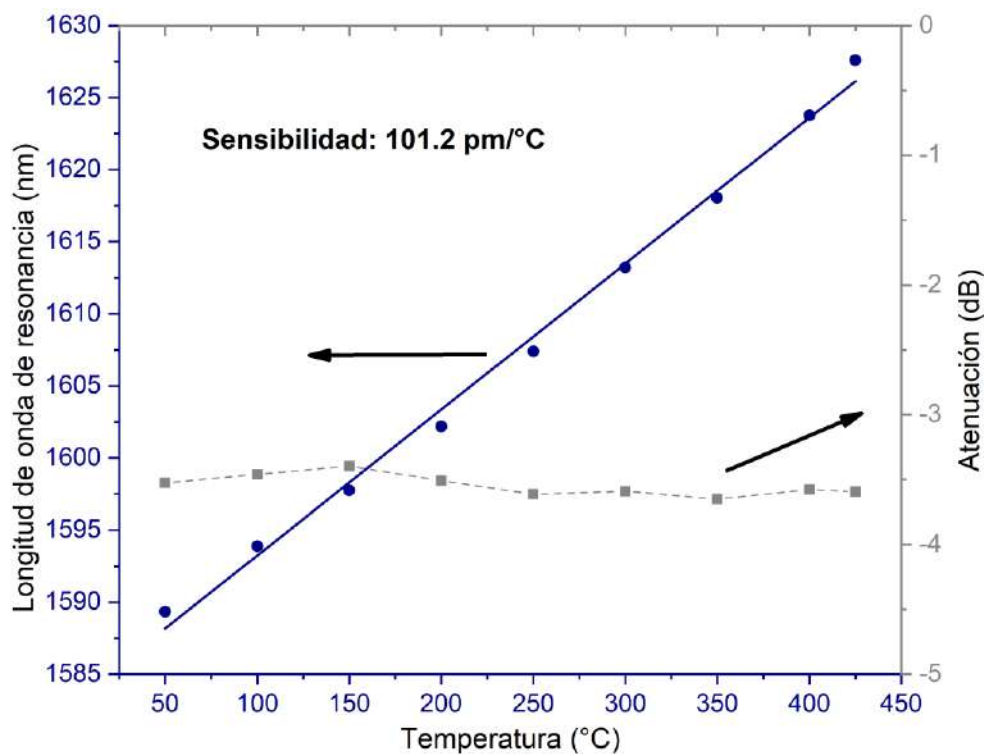


Figura 12. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la temperatura.

Se podría mejorar aún más la sensibilidad si el periodo de la RPL se diseña adecuadamente, por ejemplo, eligiendo un periodo cercano al punto de inflexión (Shu, Zhang, & Bennion, 2002). Para nuestro caso en específico, el tamaño del haz de CO₂ es del orden de 300 μm, y que el rango de periodo seleccionado de las RPL fabricadas fue de 580 μm a 700 μm, lo que quiere decir que el ciclo de trabajo de nuestras RPL fue de entre 0.428 y 0.517. Por lo que, para estos valores de ciclo de trabajo, no se observa el acoplamiento al modo de revestimiento de alto orden de difracción altamente sensible (Liu, Liu, Mou, Zou, & Wang, 2018).

III.1.2 Curvatura

El estrés mecánico que se produce debido a la curvatura y la tensión son dos factores críticos que afectan el rendimiento de las RPL. Cuando se utiliza para una aplicación en específico que es distinta a las mediciones basadas en estrés; al momento de la implementación, el empaquetado o la unión a una estructura se debe tener en cuenta la posible modificación de su respuesta debido a los efectos cruzados.

La curvatura tiene enfoque popular para su implementación en sensores de RPL prácticos que se utilizan para el monitoreo de la respiración humana (Allsop, Carroll, Webb, Bennion, & Miller, 2007) (Petrović, y otros, 2014) y sensores acústicos (Ni, y otros, 2017), entre otros.

La Figura 13 muestra el arreglo experimental que se utilizó para la caracterización de mediciones de curvatura de la RPL. La RPL se montó sobre una delgada hoja de metal de 31 cm de longitud, de un extremo estaba unida a una plataforma de traslación y en el otro extremo a una plataforma fija. Para controlar el radio de curvatura R , la plataforma de traslación se mueve hacia adentro (lo que nos da un radio más pequeño) o hacia afuera (un radio más grande).

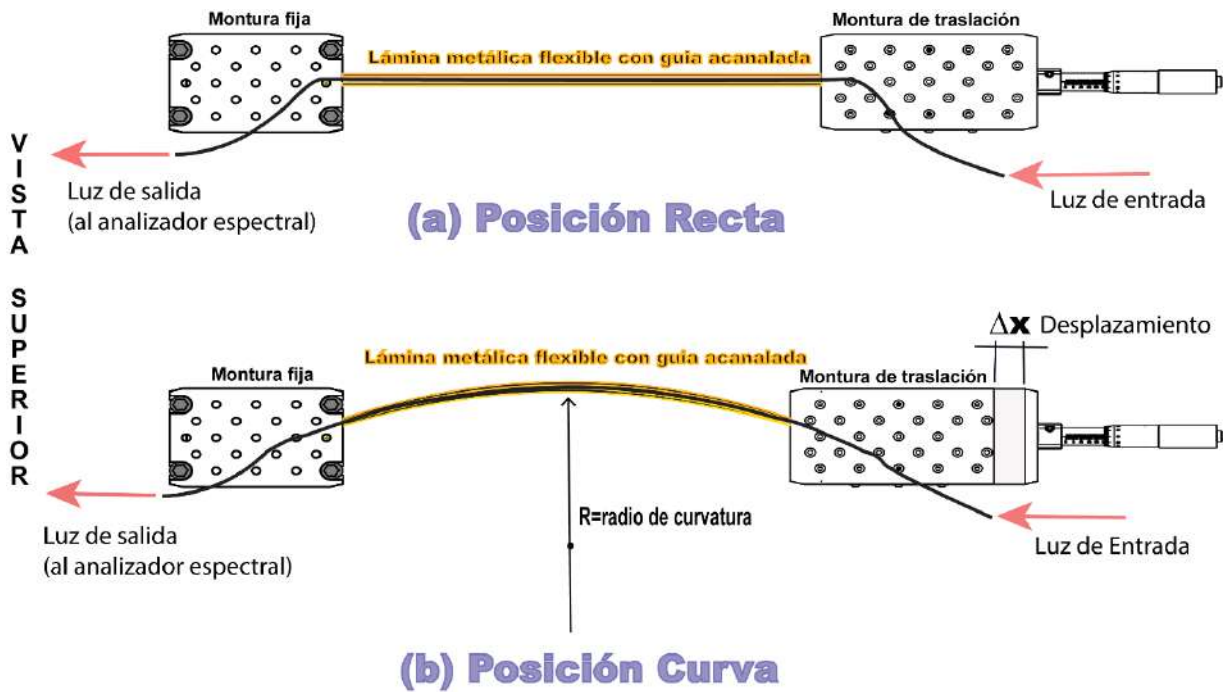


Figura 13. Arreglo utilizado para la caracterización de curvatura.

El radio de curvatura se calcula a partir de la relación:

$$R^{-1} = 2d/(d^2 + S^2) \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde S es la mitad de la distancia entre el borde de la plataforma de traslación y el borde de la plataforma fija, d es la distancia desde el centro de la RPL curva al eje neutro (Patrick, Chang, & Vohra, Long period fibre gratings for structural bend sensing, 1998) (Fernandes, y otros, 2016) (Du, Tam, Liu, & Tao, 1998).

La Figura 14 muestra una gráfica de la longitud de onda de resonancia (nm) y la profundidad (dB) vs curvatura ($1/R$). El ajuste lineal nos da una sensibilidad de -17.74 nm/m^{-1} . La sensibilidad medida para curvatura que se encuentra reportada es del orden de -11.7 nm/m^{-1} , 16.4 nm/m^{-1} y -18.48 nm/m^{-1} , valores obtenidos para RPL helicoidales fabricadas mediante irradiación con láser de CO_2 (Jung, y otros, 2009), RPL inducidas por láser de CO_2 en fibras de cristal fotónico (Park, Kim, Eom, Lee, & Paek, 2005) y RPL corrugadas (Lin, Wang, & Chern, 2001), respectivamente.

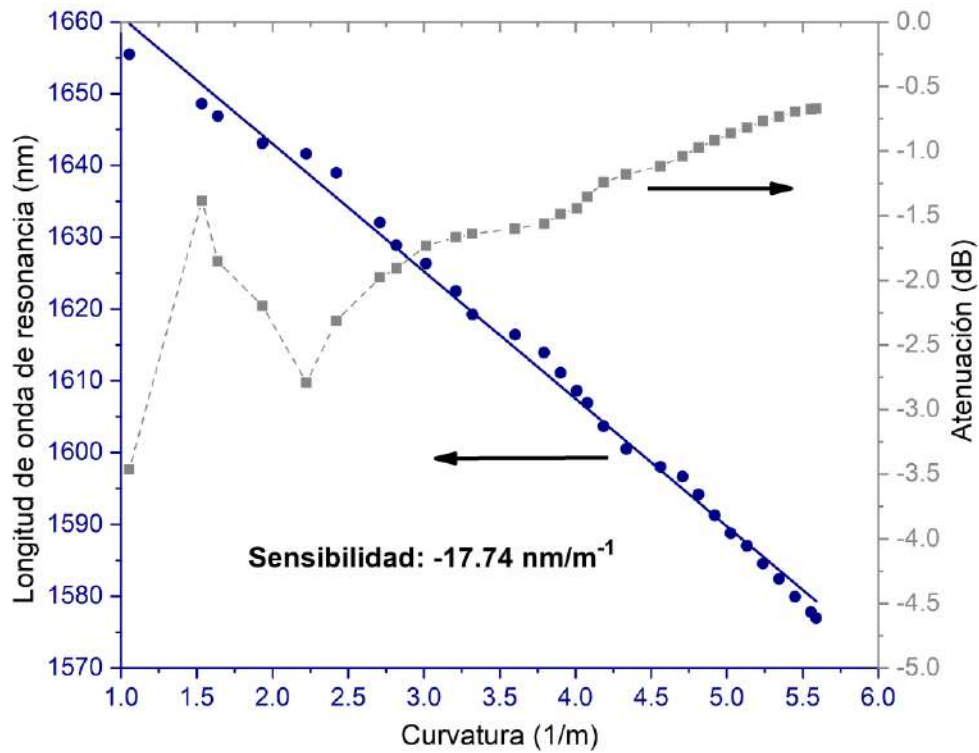


Figura 14. Mediciones en la longitud de onda de resonancia y profundidad en función de la curvatura.

La variación en la profundidad del pico (atenuación) es del orden de 3 dB, con una región altamente oscilatoria de 0 a 3.8 m⁻¹, y una zona cuasi-lineal entre 3.8 m⁻¹ y 5.6 m⁻¹. Aunque pueda existir incertidumbre en la medición de la longitud de onda de resonancia, debido al amplio ancho de banda de los picos de la RPL, el cambio en la longitud de onda de resonancia proporciona un rango de medición más extendido. Aunado a eso, como se utilizó una RPL con pico de profundidad menor a 3 dB, es más fácil seguir los cambios en la longitud de onda de resonancia ya que siempre están dentro del rango dinámico del OSA, y es más fácil determinar el centro de la longitud de onda de resonancia.

III.1.3 Tensión

Para medir la respuesta a la tensión, en la Figura 15 se muestra el arreglo experimental que se utilizó para la caracterización de mediciones de tensión de la RPL. La RPL se fijó en un extremo de la fibra y el otro extremo se fijó en una plataforma de traslación.

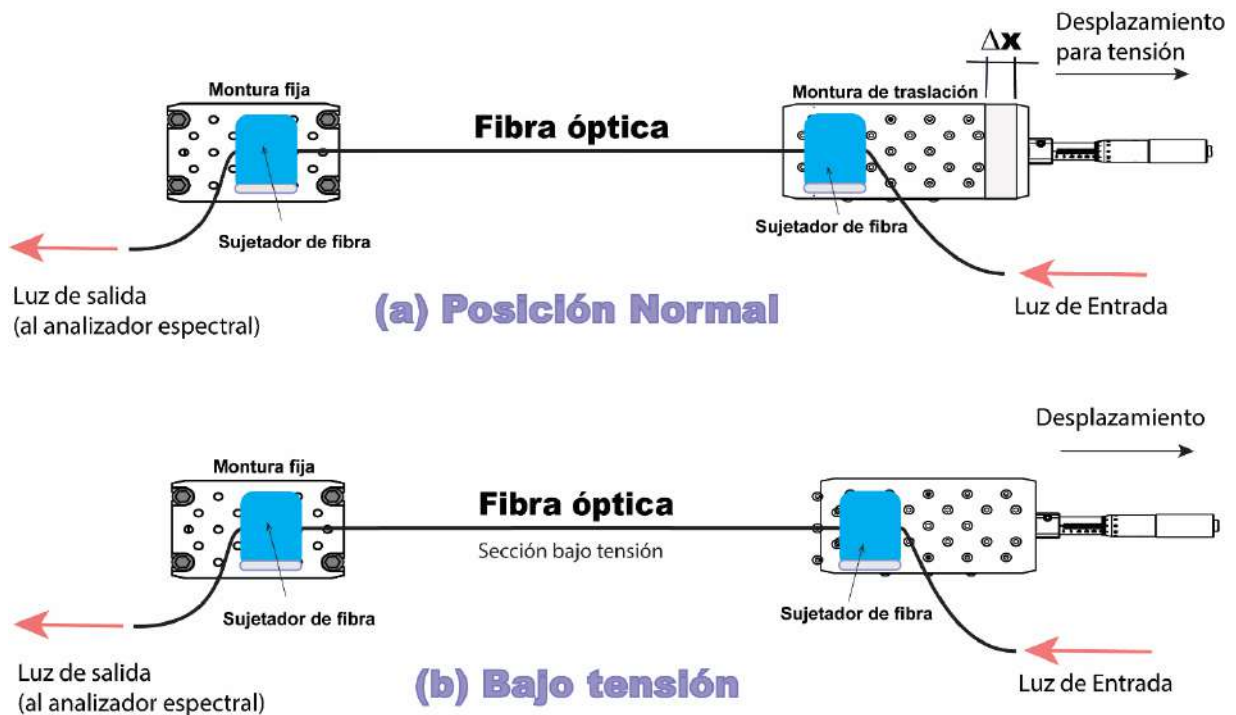


Figura 15. Arreglo utilizado para la caracterización de tensión.

Para calcular la micro-deformación, se utiliza la siguiente relación:

$$\text{Micro - Tensión} = (\Delta L/L) \times 10^6 \quad \text{Ecuación (3)}$$

donde L es la longitud original y ΔL es el incremento fraccional de longitud. La sensibilidad obtenida fue de $-1.05 \text{ pm}/\mu\text{tensión}$ como se muestra en la Figura 16. Esta sensibilidad es del orden de la obtenida en RPL helicoidales (Jung, y otros, 2009). Para el caso

de la atenuación, no se observa una variación considerada en la profundidad, debido que entre la máxima y mínima profundidad observada, hay una diferencia de 0.267 dB.

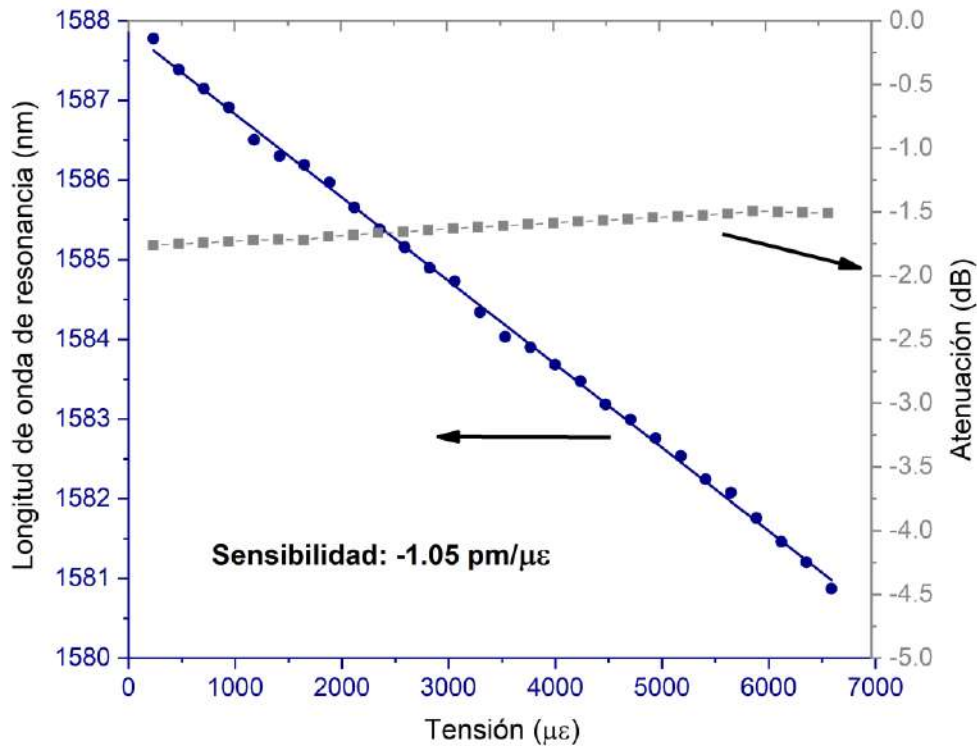


Figura 16. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la Micro-tensión.

III.2 Aplicación a sensado de soluciones líquidas

Debido a sus posibles aplicaciones en la caracterización de muestras químicas y biológicas, los sensores de índice de refracción de RPL son un tema importante en continuo estudio. La sensibilidad de las RPL al índice de refracción se puede medir sumergiéndolas en soluciones de glicerina y agua destilada (Wang, Sang, Zhong, & Dong, 2017) para que de este modo sea posible obtener la respuesta a los cambios del índice de refracción entre ~ 1.333 (agua pura) y ~ 1.473 (glicerina pura).

Las RPL son capaces de medir índices de refracción más bajos y más altos que los del revestimiento (Patrick, Kersey, & Bucholtz, Analysis of the response of Long Period Fiber Gratings to External Index of Refraction, 1998), por lo que sería posible medir soluciones líquidas de diferentes fluidos gracias a esta sensibilidad.

Otra aplicación de las RPL es la medición de soluciones de hidrocarburos (Falate, Kamikawachi, Muller, Kalinowski, & Fabris, 2005) (Monteiro-Silva, Santos, de Almeida, & Coelho, 2018). Particularmente, los sensores de hidrocarburos son objeto de mucho interés para aplicaciones como el control de calidad del combustible y la monitorización medioambiental.

En la Figura 17 se muestra el arreglo experimental utilizado para la medición de soluciones líquidas (índice de refracción y soluciones de hidrocarburos). Para estas pruebas, se mezcló glicerina en agua destilada en diferentes proporciones y gasolina en alcohol en diferentes proporciones, respectivamente. Como se observa en la figura, primero se colocó la RPL sobre el portaobjetos, posteriormente se le depositó aproximadamente 0.1ml de la solución.

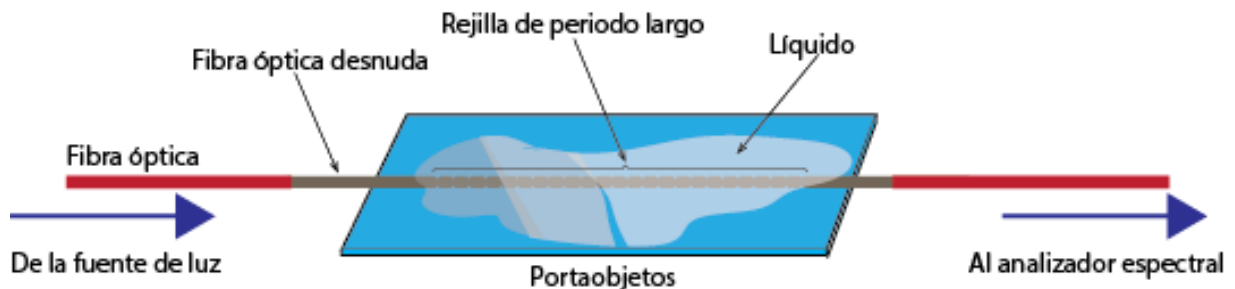


Figura 17. Arreglo utilizado para la caracterización de índice de refracción y soluciones de hidrocarburos.

En la Figura 18 se muestra el cambio en la longitud de onda de resonancia en función de la proporción de glicerina en agua destilada. Si la concentración de glicerina aumenta, el índice de refracción de la solución también aumenta.

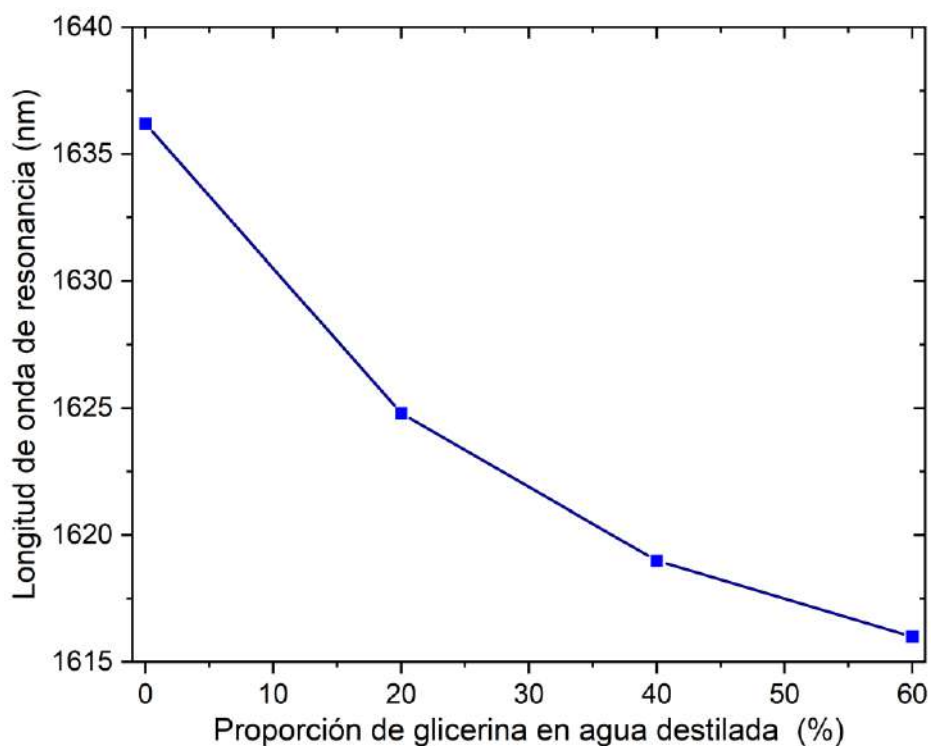


Figura 18. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la proporción de glicerina en agua destilada en %.

En la Figura 19 se muestra el cambio en la longitud de onda de resonancia en función de la proporción de gasolina en alcohol. La sensibilidad obtenida fue de 514 pm/% de gasolina en alcohol. Las proporciones de gasolina en alcohol se prepararon al momento de las mediciones para evitar que el alcohol o la gasolina se evaporaran. La sensibilidad es ligeramente inferior a la obtenida con una RPL recubierta con óxido cuproso (Monteiro-Silva, Santos, de Almeida, & Coelho, 2018).

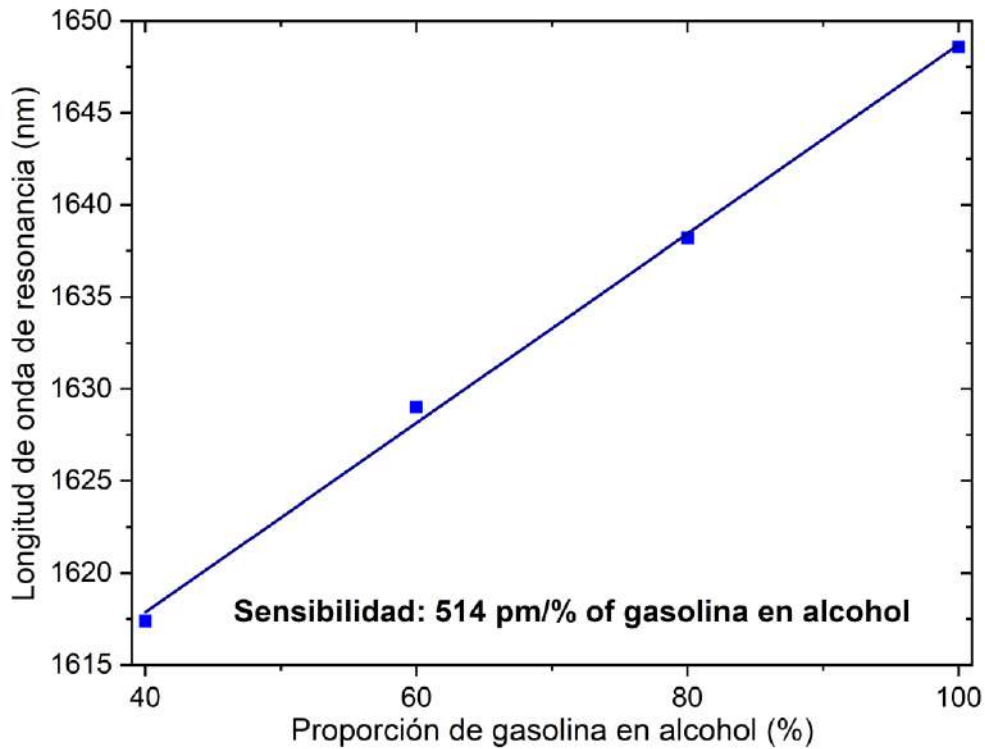


Figura 19. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función de la proporción de gasolina en alcohol.

III.3 Perfil y sección transversal de la fibra

Para observar el perfil y la sección transversal de una RPL, se utilizó un SEM (microscopio electrónico de barrido), para poder así, observar las diferencias en el núcleo y revestimiento de las secciones de fibra procesada y no procesada en un periodo individual.

En la Figura 20 podemos observar el perfil y las vistas de la sección transversal de un periodo individual dentro de una RPL; estas vistas corresponden a cortes ubicados en la sección sin procesar y en la cintura del adelgazamiento, respectivamente. Para permitir la visualización de los cambios en el índice de refracción (IR) después del proceso de calentamiento y estiramiento, los extremos cortados de las fibras fueron tratados con una solución de ácido fluorhídrico (HF) al 48% de concentración durante 3 minutos.

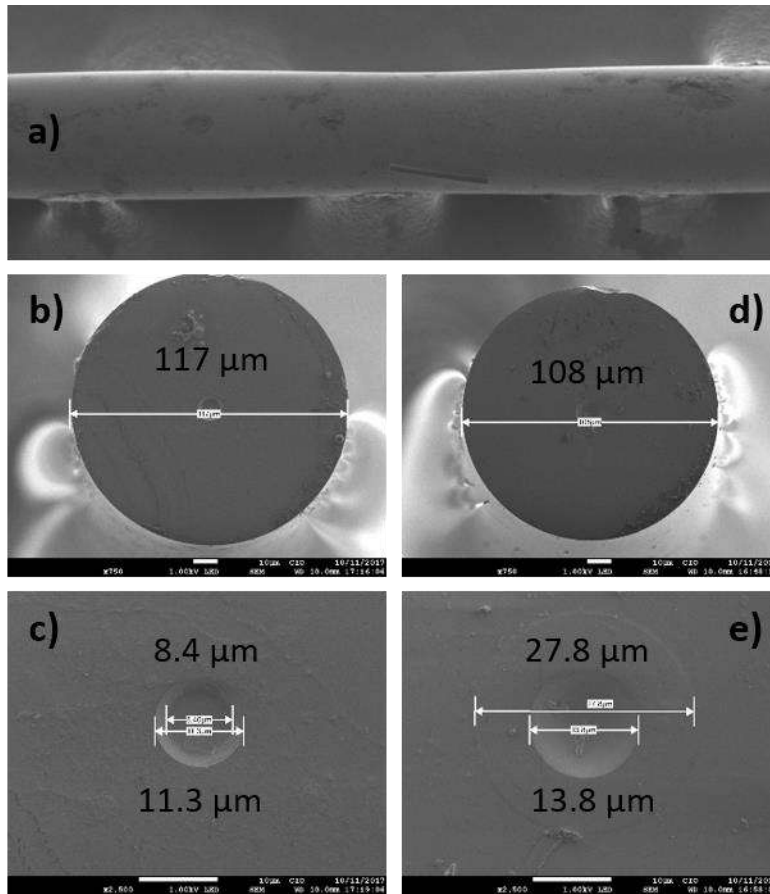


Figura 20. (a) Perfil de la sección adelgazada de cada periodo de la RPL; (b) y (c) muestran las dimensiones del revestimiento y el núcleo en la sección sin adelgazar (sin procesar) del periodo de la RPL; (d) y (e) muestran las dimensiones transversales del revestimiento y el núcleo en la cintura adelgazada (después de tres minutos en solución de ácido fluorhídrico).

La solución de HF reacciona más rápidamente con el dopante GeO_2 en el núcleo de la fibra, lo que da como resultado una degradación más rápida en la región del núcleo, lo que permite que los límites del núcleo y revestimiento sean claros, como se observa en las imágenes SEM. A la vez el dopante GeO_2 al estar sometido al calentamiento se difunde hacia el recubrimiento, lo cual explica el ensanchamiento del núcleo, observado en la parte estrechada de la RPL.

Lo que se observó es que, en el caso de la sección sin procesar, hay un cambio brusco en el límite del núcleo y revestimiento (Figura 20 b) y c)), y en el caso de la sección procesada (cintura del adelgazamiento), la difusión inducida térmicamente en el núcleo por el dopante

produce un relieve superficial en forma de cuenco, que quiere decir que hay una expansión en el núcleo que está relacionado con una reducción del IR (Figura 20 d) y e)).

En la figura 20, lo que se hizo fue un proceso de desbaste químico para poder discriminar el núcleo, que debe tener una diferente composición del resto de la fibra, si suponemos que, si tiene GeO_2 , este al someterlo a un baño de HF se va a desbastar más rápido que el resto del material. Como observamos en la figura, el diámetro que medimos en el SEM para el núcleo (Figura 20 c)), es aproximadamente el mismo diámetro que viene en los datos del fabricante, que debe ser de aproximadamente $8.3 \mu\text{m}$ para SMF-28. Aunque puede haber otro dopante como el aluminio que podría afectar, consideramos que su efecto no es tan aparente, por eso creemos que la medición que se ve en la Figura 20 e), es efectivamente un cambio en el perfil debido al efecto del láser de CO_2 .

Para encontrar un modelo que se acerque lo más posible a las condiciones experimentales utilizadas en la fabricación de las RPL, es necesario recopilar información como la geometría del adelgazamiento y los cambios del índice de refracción debido a la liberación de estrés.

Se asumió entonces que la contribución de la liberación de estrés es una reducción constante (independiente de la longitud de onda) del índice de refracción del núcleo de 4×10^{-4} , y que el núcleo incrementó linealmente de $8.4 \mu\text{m}$ en la sección de la fibra no adelgazada a $13.8 \mu\text{m}$ en la cintura de la fibra adelgazada, el revestimiento se redujo de $117 \mu\text{m}$ en la sección no adelgazada a $108 \mu\text{m}$ en la cintura del adelgazamiento. Además, se tuvo en cuenta la dispersión del material en el núcleo asumiendo una concentración de GeO_2 de 4.1 % en moles, mientras que se asumió que el revestimiento era vidrio de sílice puro.

III.4 Mediciones de índice de refracción

En la Figura 21 se muestran los resultados de la simulación utilizando los parámetros descritos anteriormente, donde cada curva corresponde a un índice de refracción externo diferente, y muestra que a medida que el índice de refracción aumenta de 1.0 a 1.44, las longitudes de onda de resonancia disminuyen.

Cabe recalcar que el pico alrededor de $1.58 \mu\text{m}$ experimenta un pequeño cambio de longitud de onda, que no coincide con el comportamiento observado en la sección III.2 (caracterización del índice de refracción), es decir, los cambios de longitud de onda son más significativos en estos casos. Es importante mencionar que las RPL utilizadas para los experimentos descritos en la sección III.2 fueron fabricados en la temporada de invierno.

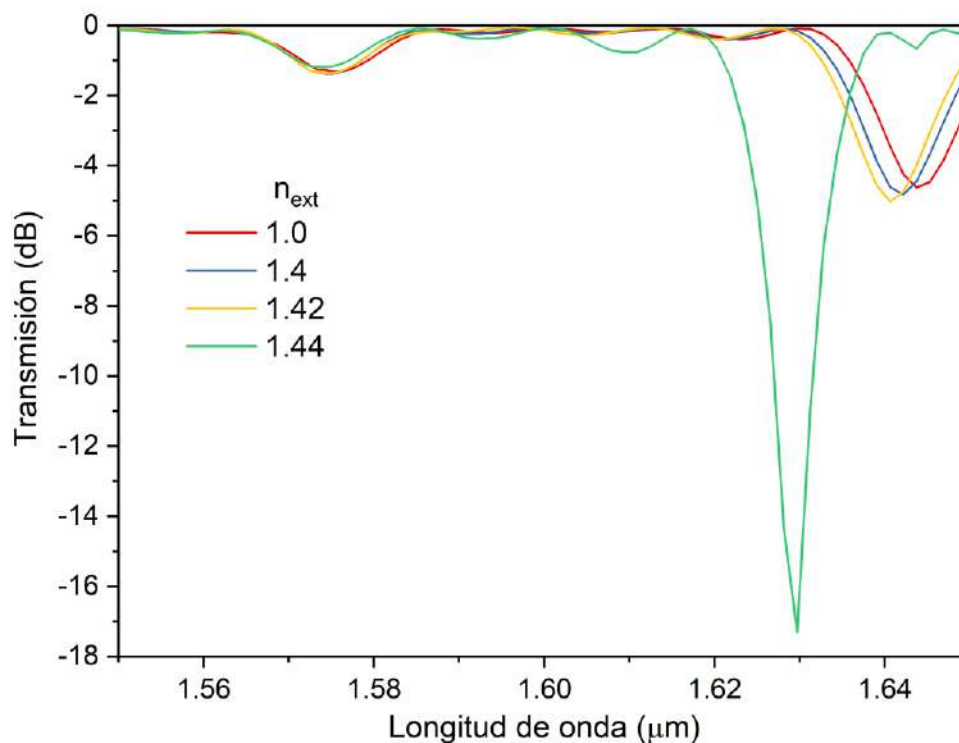


Figura 21. Espectros de transmisión simulados para diferentes índices de refracción externos.

En las Figuras 22 y 23 se muestran los resultados experimentales de tres RPL diferentes, en los que los líquidos utilizados para su caracterización fueron índices de refracción calibrados por Cargille. A pesar de que las RPL utilizadas en estas mediciones fueron fabricados el mismo día, se puede observar que el pico de la Figura 22 muestra un cambio más significativo de la longitud de onda de resonancia al hacer un cambio en el índice de refracción que el que se observa en la Figura 23.

Las mediciones para la caracterización de las RPL 1 (Figura 22) y RPL 2 y 3 (Figura 23) se realizaron en un día diferente, de hecho, con una diferencia significativa en humedad y temperatura. El comportamiento que se observa en la Figura 23 se parece más al obtenido teóricamente en la Figura 21.

Toda esta información es esencial para la implementación de un dispositivo práctico, que debe garantizar estabilidad, y requiere una caracterización más detallada y un estudio teórico de todos los factores que pueden afectar su rendimiento.

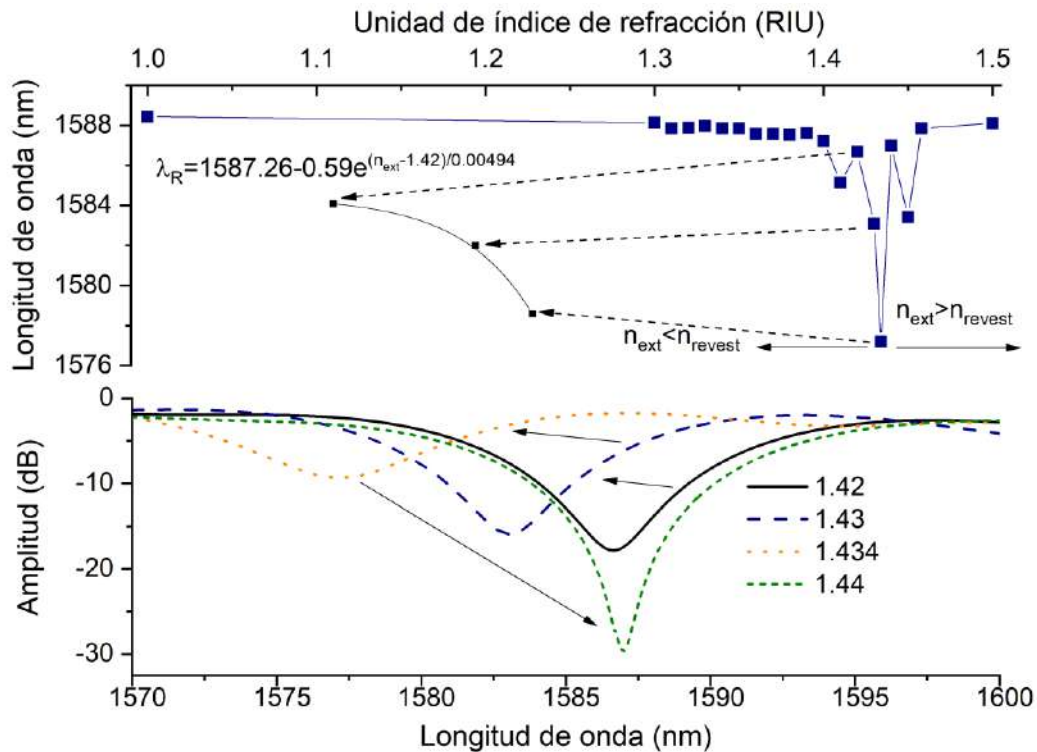


Figura 22. Mediciones en la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (gráfica de arriba) correspondiente a la RPL 1. La gráfica de abajo muestra el espectro de transmisión medido con cuatro índices de refracción externos diferentes.

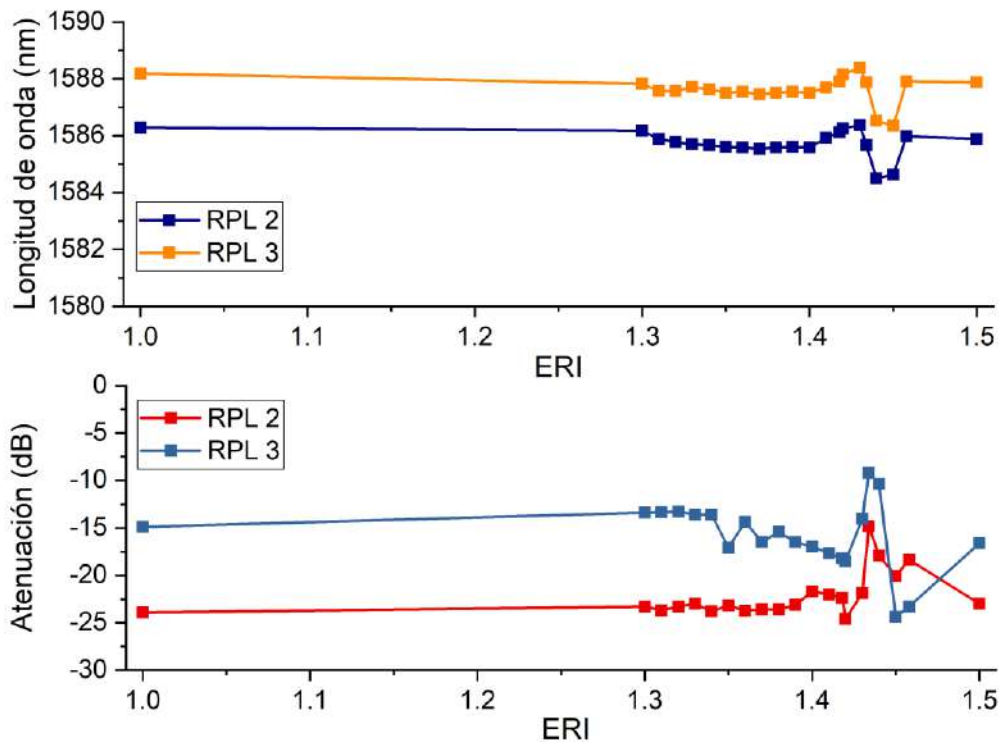


Figura 23. Mediciones en la longitud de onda de resonancia (arriba) y la profundidad del pico (abajo), en función del índice de refracción externo (ERI), que corresponde a las RPL 2 y 3, respectivamente.

III.5 Pre-post tratamiento térmico en RPL

Para observar cómo se comportan las RPL al ser sometidas a un pre-post tratamiento térmico, se realizaron pruebas que consistían en; la fabricación de la RPL sin aplicar tratamiento térmico, la fabricación de la RPL aplicándole un post tratamiento térmico, la fabricación de la RPL aplicándole un pre tratamiento térmico y la fabricación de la RPL aplicándole un pre y post tratamiento térmico.

Estas pruebas se decidieron hacer con fibra SMF-28 (que ya se estaba trabajando) y se decidió trabajar también con fibra 980-HP y 1060-XP, para caracterizarlas durante las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). Tanto la fabricación como el tratamiento térmico se realizó con la procesadora de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL) con lente cilíndrica de enfoque.

Para saber cuál era la cantidad de potencia óptima para aplicar el pre-post tratamiento térmico, se realizaron pruebas aplicando post calentamiento con diferentes potencias a lo largo de la sección de fibra desnuda con la RPL previamente grabadas, para determinar así la potencia adecuada con la que la RPL no se altera; es decir, que no se modifica o borra.

Para estas pruebas se fabricaron 6 RPL de 600 μm y 52 periodos en fibra 1060-XP. A cada una se le aplicó un post calentamiento con una potencia diferente, partiendo de la potencia estándar de calibración de la procesadora de vidrio con láser de CO_2 LZM-100 de AFL (10 W aproximadamente), se le restaron 1.52, 3.03, 4.55, 6.06, 7.58 y 9.09 W respectivamente al valor estándar de calibración.

En la Figura 24 se observan las mediciones con las diferentes potencias, los espectros de color negro corresponden a las RPL sin aplicar el post calentamiento y los espectros de color rojo corresponden a las RPL con el post calentamiento.

Pruebas con diferentes potencias para tratamiento térmico

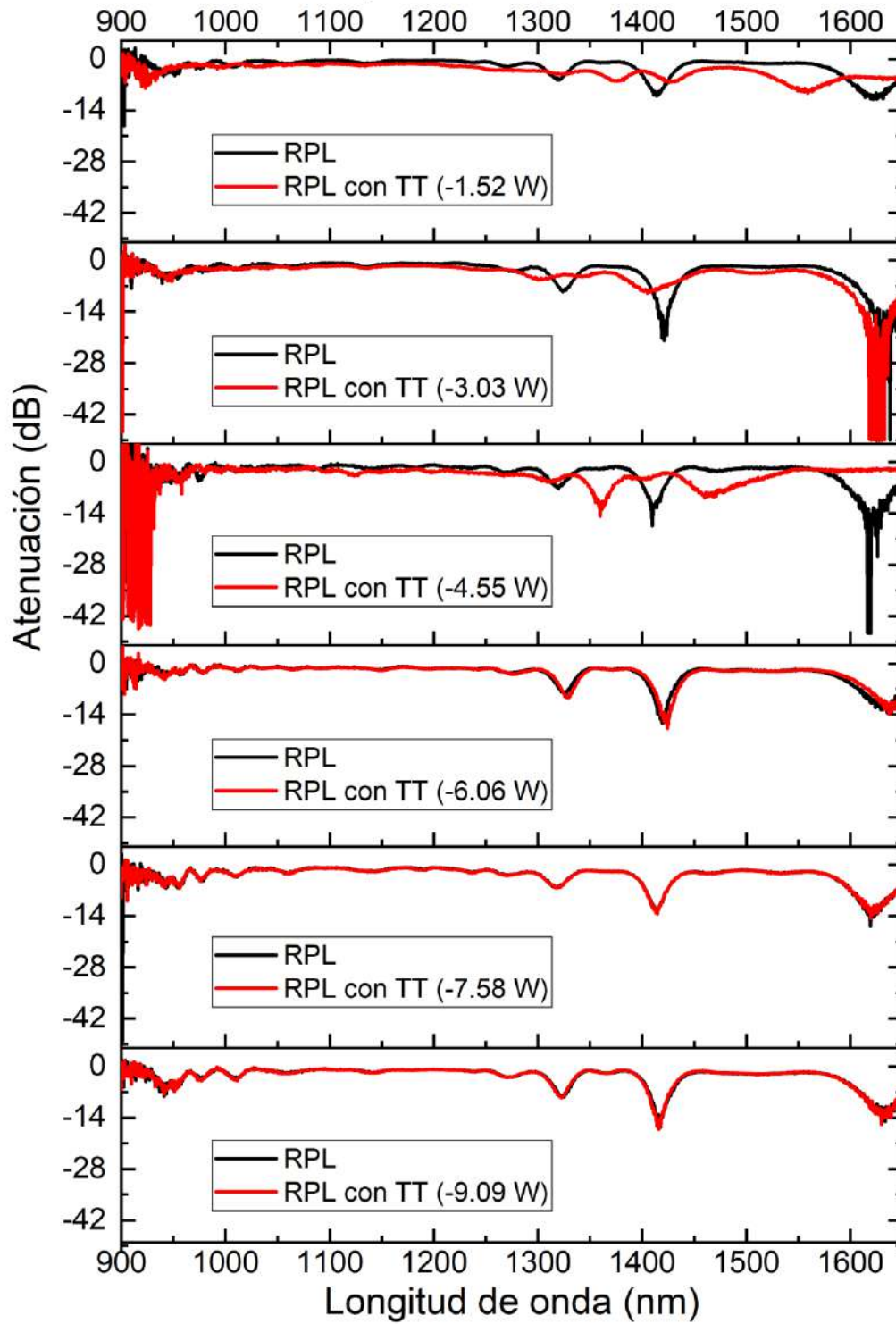


Figura 24. Mediciones con las diferentes potencias, los espectros de color negro corresponden a las RPL sin aplicar el post calentamiento y los espectros de color rojo corresponden a las RPL con el post calentamiento.

A partir de esto, se obtuvo que la potencia óptima para la aplicación del tratamiento térmico es del estándar de calibración menos 7.58 W, lo que nos da una potencia resultante de 2.42 W, con la que no se altera el espectro o se borra la RPL.

Las pruebas que se realizaron en las RPL en fibra SMF-28 fueron con tratamiento térmico al inicio, es decir, una vez que se le aplicó a la fibra el tratamiento inicial, se fabricó la RPL en esa área tratada. Y con tratamiento térmico al inicio y al final, es decir, una vez que se le aplicó a la fibra el tratamiento inicial, se fabricó la RPL en esa área tratada y finalmente se volvió a dar un tratamiento térmico en la misma área. Estas pruebas se realizaron en RPL con periodos de 500, 600, 650 y 700 μm . El rango de medición fue de 1400 a 1650 nm. Para esta fibra no se realizaron pruebas sin tratamiento térmico ni con tratamiento térmico al final.

Las pruebas que se realizaron en las RPL en fibras 980-HP y 1060-XP fueron;

- Sin tratamiento térmico (STT), es decir, solamente se fabricó la RPL.
- Con tratamiento térmico al final (TTfin), es decir que después de fabricar la RPL, se aplicó un tratamiento térmico en el área de la RPL.
- Con tratamiento térmico solamente al inicio (TTin), es decir, primero se aplicó el tratamiento térmico y posteriormente se fabricó la RPL en el área tratada térmicamente.
- Con tratamiento térmico al inicio y al final (TTinfin), es decir, una vez que se le aplicó a la fibra el tratamiento térmico inicial, se fabricó la RPL en esa área tratada y finalmente se volvió a dar un tratamiento térmico en la misma área.

Estas pruebas se realizaron en RPL con periodos de 300, 400, 500, 600 y 700 μm . El rango de medición fue de 850 a 1650 nm, utilizando una fuente de luz blanca.

Para revisar todos los datos obtenidos y realizar una mejor comparación, se analizaron los picos de atenuación en cada curva, para obtener la posición y la profundidad en cada pico. Posteriormente se graficó la posición (longitud de onda) vs Estación del año (primavera, verano, otoño e invierno) y la profundidad (dB) vs Estación del año (primavera, verano, otoño e

invierno). Se presentan a continuación las gráficas representativas correspondientes a los picos más profundos para cada RPL.

III.5.1 RPL con fibra SMF-28

Para las RPL con fibra SMF-28 con un periodo de 500 (Figura 25), 600 (Figura 26) y 650 μm (Figura 27), el segundo pico es el más profundo. Para un periodo de 700 μm (Figura 28), el tercer pico es el más profundo. En las Figuras 25, 26, 27 y 28, se observa cómo cambia la posición del pico (nm) y la profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

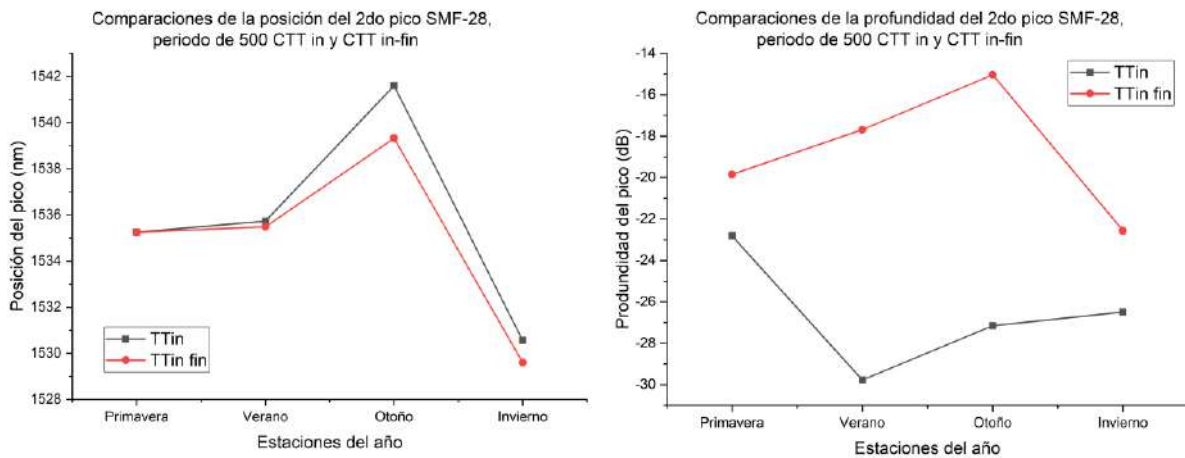


Figura 25. RPL en fibra SMF-28 con 500 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Con un periodo de 500 μm se observa una mayor estabilidad de la posición de los picos, durante las cuatro estaciones del año, cuando la RPL es CTT al inicio y al final, en cambio para la profundidad no es constante, ya que para el 1er pico es más estable CTT al inicio y al final, y

en el 2do pico es más estable CTT al inicio. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, tanto en el caso de la posición como de la profundidad, en primavera es cuando se observa mayor estabilidad, solo en el caso particular del 1er pico de la posición, que es primavera y verano. Y en el 2do pico es exactamente la misma posición.

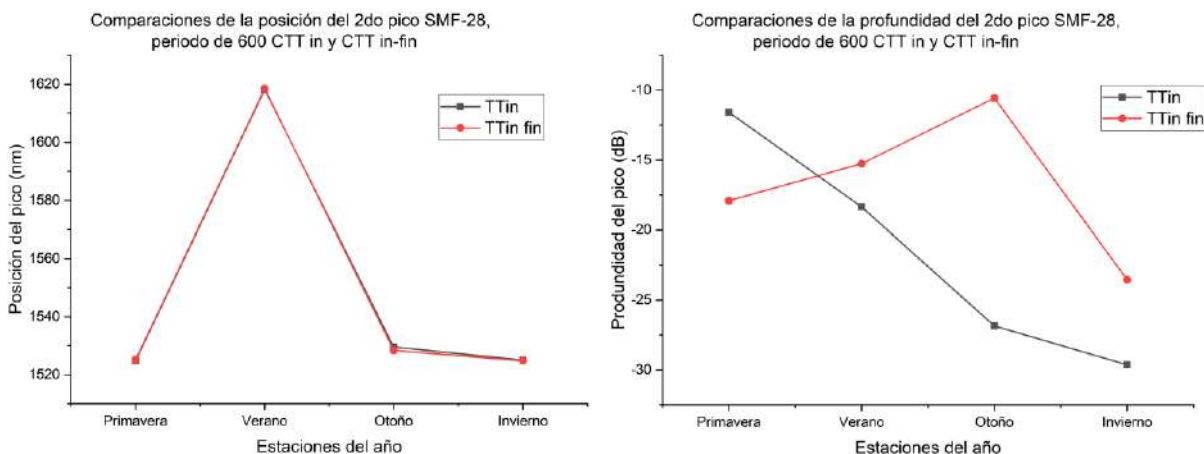


Figura 26. RPL en fibra SMF-28 con 600 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Para un periodo de 600 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er y 3er pico es más estable CTT al inicio y al final, y en el 2do pico es más estable CTT al inicio. En cambio, para la profundidad, en ambos picos se observa una mayor estabilidad cuando la RPL es CTT al inicio y al final. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er pico se mantiene más estable en primavera, el 2do en invierno y el 3er en otoño e invierno. En cuanto a la profundidad, en verano se observa mayor estabilidad.

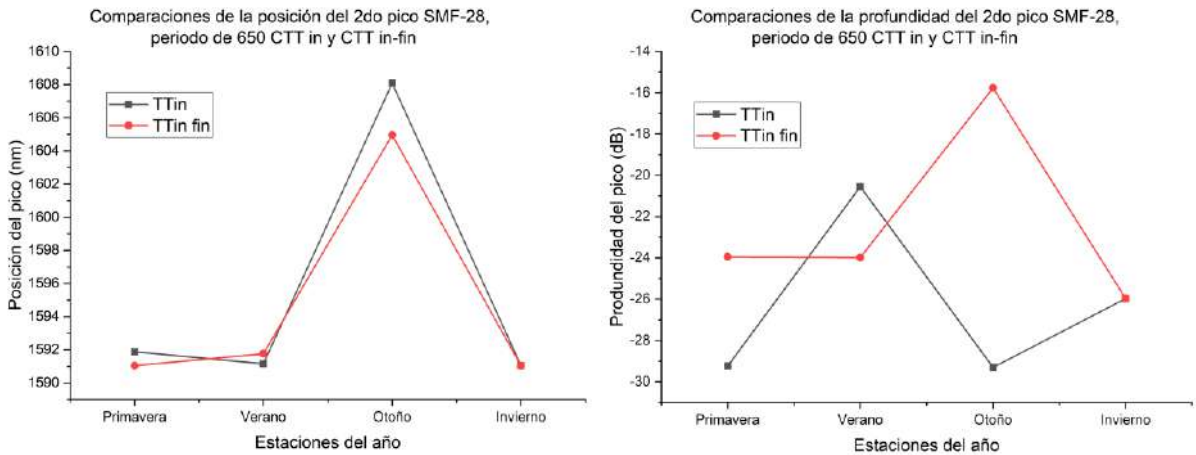


Figura 27. RPL en fibra SMF-28 con 650 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Con un periodo de 650 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er pico es más estable CTT al inicio y en el 2do pico es más estable CTT al inicio y al final. En cambio, para la profundidad, en ambos picos se observa una mayor estabilidad cuando la RPL es CTT al inicio. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, tanto en el caso de la posición como de la profundidad, en invierno es cuando se observa mayor estabilidad, teniendo exactamente la misma posición y profundidad en ambos tratamientos.

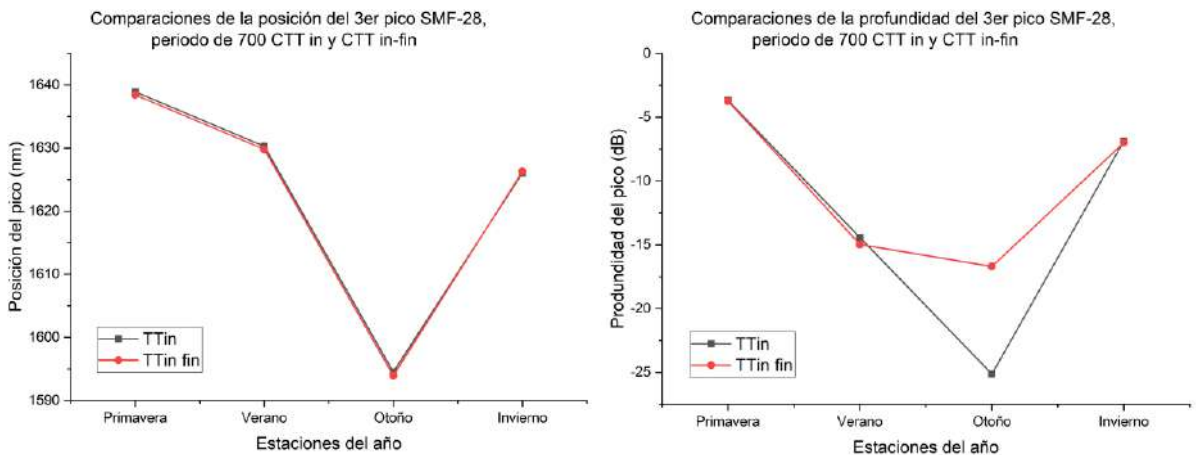


Figura 28. RPL en fibra SMF-28 con 700 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL con Tratamiento térmico al inicio (curvas negras) y con Tratamiento térmico al inicio y final (curvas rojas).

Para un periodo de 700 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er y 3er pico es más estable CTT al inicio y en el 2do pico es más estable CTT al inicio y al final. En cambio, para la profundidad, en los tres picos se observa una mayor estabilidad cuando la RPL es CTT al inicio y al final. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er pico se mantiene más estable en invierno, el 2do en primavera y verano, y el 3er pico en invierno. Tampoco la profundidad es constante, para el 1er pico se mantiene más estable en invierno, el 2do en verano, y el 3er pico en primavera.

III.5.2 RPL con fibra 980-HP

Para las RPL con fibra 980-HP con un periodo de 300 (Figura 29) y 400 (Figura 30), el cuarto pico es el más profundo. Para un periodo de 500 μm (Figura 31), el tercer pico es el más profundo. Para un periodo de 600 μm (Figura 32), el sexto pico es el más profundo. Y para un periodo de 700 μm (Figura 33), el séptimo pico es el más profundo. En las Figuras 29, 30, 31, 32 y 33, se observa cómo cambia la posición del pico (nm) y la profundidad del pico (dB) en

las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

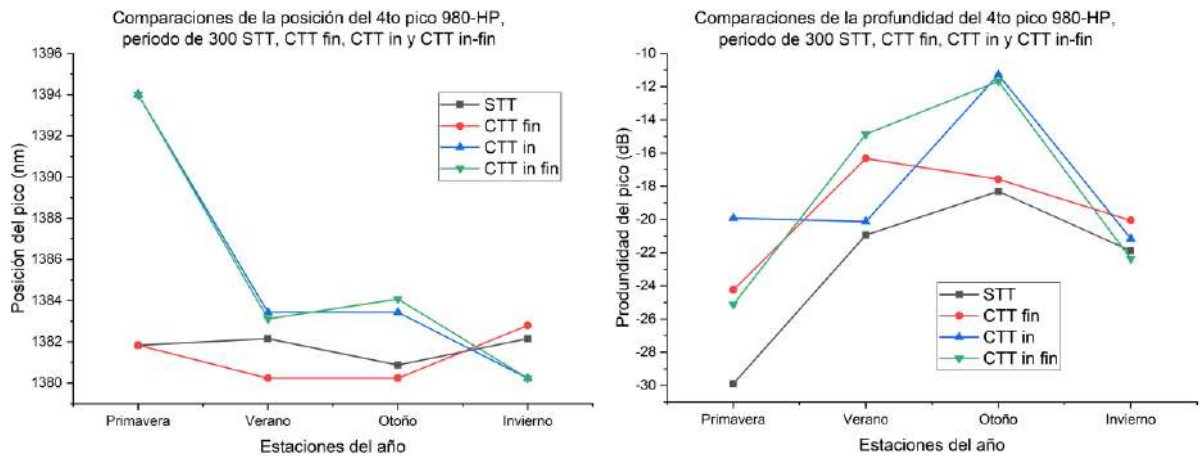


Figura 29. RPL en fibra 980-HP con 300 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 300 μm se observa una mayor estabilidad de la posición de los picos, durante las cuatro estaciones del año, cuando la RPL es STT, excepto en el 5to pico que es STT y CTT al final., en cambio para la profundidad no es constante, ya que para el 1er, 4to y 5to picos son más estables CTT al final, el 2do pico es más estable STT y el 3er CTT al inicio. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er, 2do y 3er picos se mantienen más estables en verano, y el 4to y 5to en invierno. Tampoco la profundidad es constante, en el 1er y 5to pico se mantiene más estable en verano, el 2do y 3er en otoño, y el 4to pico en invierno.

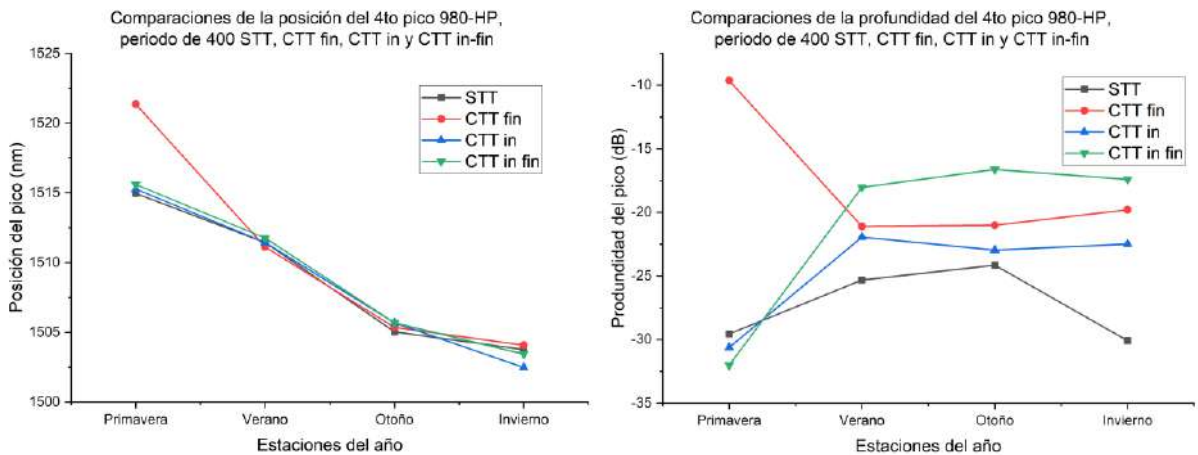


Figura 30. RPL en fibra 980-HP con 400 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 400 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er pico es más estable CTT al inicio, en el 2do y 4to pico es más estable STT y en el 2do STT y CTT al inicio. Tampoco la profundidad es constante, ya que para el 1er pico es más estable CTT al inicio, el 2do y 3er picos son más estables CTT al final y el 4to STT. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición, en verano y otoño se observa la mayor estabilidad, excepto para el 1er pico que solo es en verano. Para la profundidad solo es constante en el 2do, 3er y 4to pico, que se mantiene más estable en verano, pero en el 1er pico es en otoño.

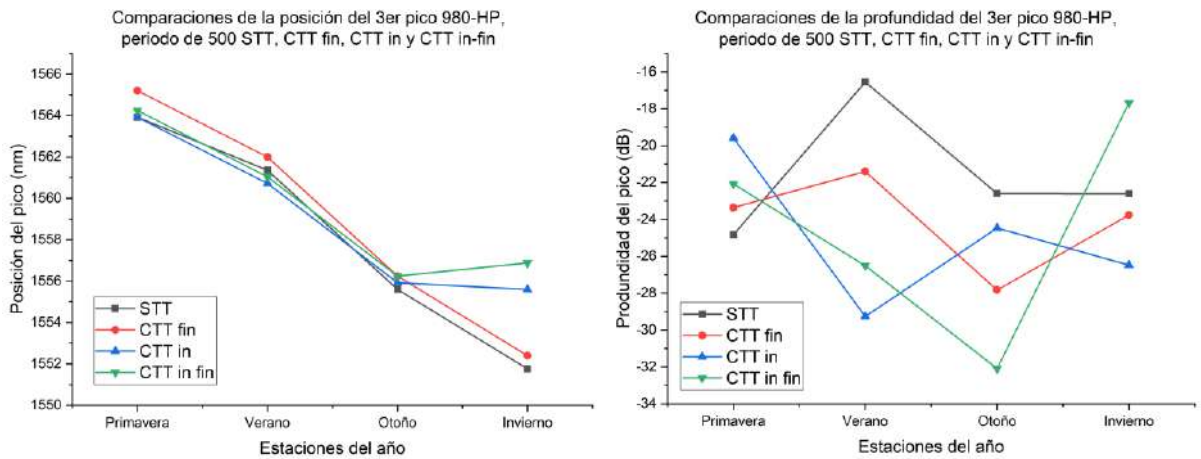


Figura 31. RPL en fibra 980-HP con 500 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 500 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er pico es más estable CTT al inicio y en el 2do y 3er pico es más estable CTT al inicio y al final. Tampoco la profundidad es constante, ya que para el 1er pico es más estable STT, el 2do pico CTT al inicio y el 3er pico CTT al final. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición, en otoño se observa la mayor estabilidad, y en el caso de la profundidad, en primavera se observa la mayor estabilidad.

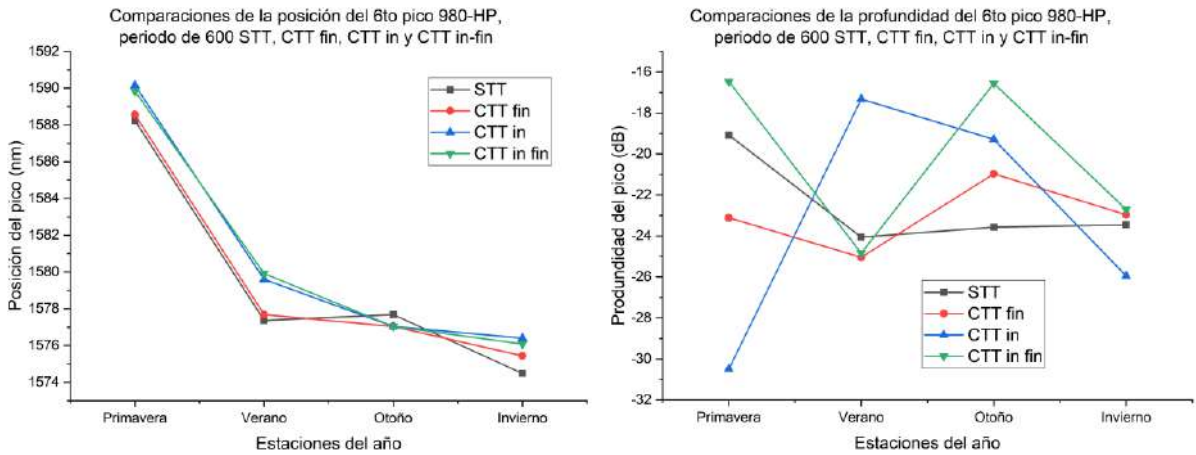


Figura 32. RPL en fibra 980-HP con 600 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 600 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er pico es más estable CTT al final y CTT al inicio y al final, en el 2do, 3er y 6to picos son más estables CTT al final, en el 4to STT y en el 5to STT y CTT al final. Tampoco la profundidad es constante, ya que para el 1er, 2do, 3er y 6to picos son más estables CTT al final, el 4to CTT al inicio y al final, y el 5to STT. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er y 6to picos se mantienen más estables en otoño, el 2do y 4to en primavera y el 3er y 5to en invierno. Tampoco la profundidad es constante, en el 1er pico se mantiene más estable en verano, el 2do, 3er, 4to y 5to en primavera, y el 6to pico en invierno.

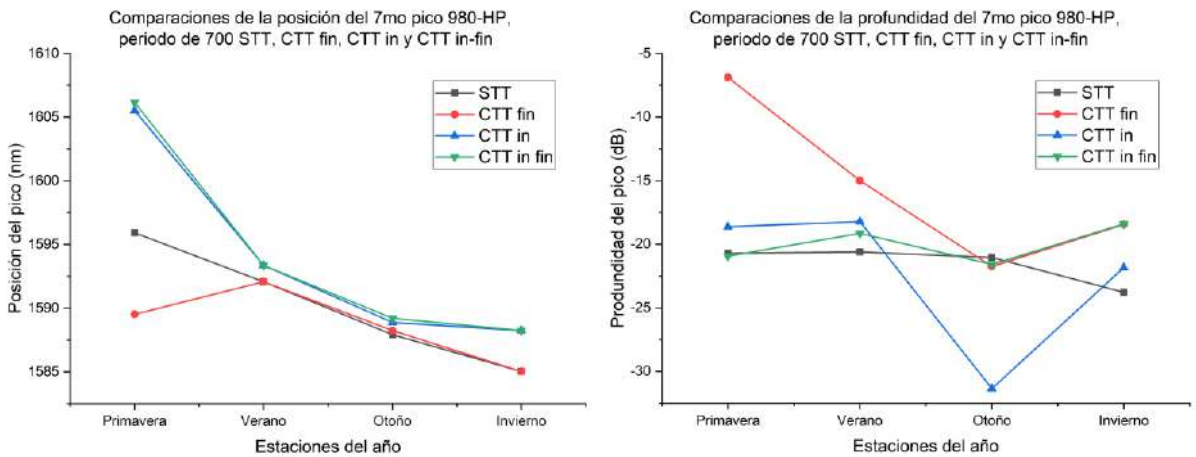


Figura 33. RPL en fibra 980-HP con 700 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 700 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er, 3er, 4to y 7mo picos son más estables CTT al final, en el 2do STT y CTT al final, en el 5to y 6to picos son más estables STT. Con la profundidad casi es completamente constante, ya que para el 1er, 2do, 3er, 4to y 5to picos son más estables CTT al final, pero en el 6to es CTT al inicio y en el 7mo STT. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er, 2do y 5to picos se mantienen más estables en verano, el 3er y 4to en otoño y el 6to y 7mo en verano y otoño. Tampoco la profundidad es constante, en el 1er, 2do y 5to picos se mantienen más estables en verano, el 3er, 4to y 6to en otoño, y el 7mo pico en invierno.

III.5.3 RPL con fibra 1060-XP

Para las RPL con fibra 1060-XP con un periodo de 300 (Figura 34) y 400 (Figura 35), el cuarto pico es el más profundo. Para un periodo de 500 μm (Figura 36), el tercer pico es el más profundo. Para un periodo de 600 μm (Figura 37), el noveno pico es el más profundo. Y para

un periodo de 700 μm (Figura 38), el cuarto pico es el más profundo. En las Figuras 34, 35, 36, 37 y 38, se observa cómo cambia la posición del pico (nm) y la profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

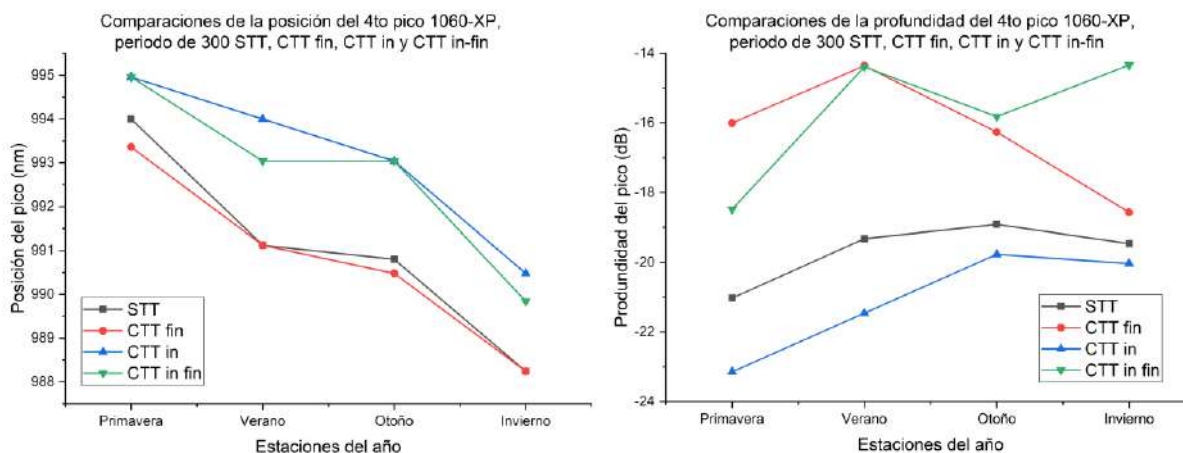


Figura 34. RPL en fibra 1060-XP con 300 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 300 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er, 2do, 4to y 5to picos son más estables CTT al inicio, en el 3er pico CTT al final y CTT al inicio, en el 6to STT y CTT al final, y el 7mo STT. Con la profundidad casi es completamente constante, ya que para el 1er, 2do, 4to, 5to y 6to picos son más estables STT, pero en el 3er pico es CTT al final y en el 7mo CTT al inicio y al final. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er, 4to y 5to picos se mantienen más estables en primavera, el 2do y 6to en invierno, el 3er en primavera e invierno y 7mo en verano. Tampoco la

profundidad es constante, en el 1er, 2do, 6to y 7mo picos se mantienen más estables en primavera, el 3er y 4to en otoño y el 5to pico en verano.

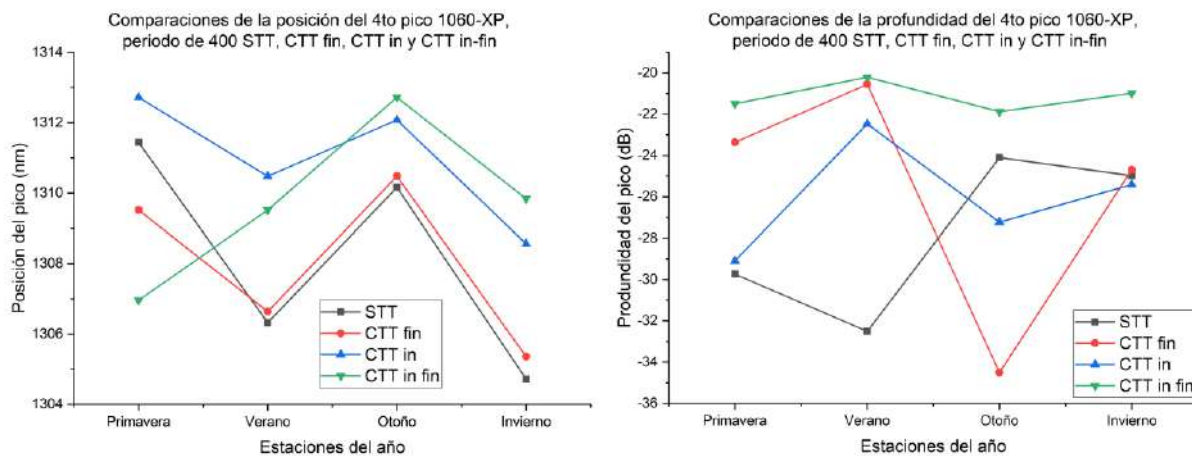


Figura 35. RPL en fibra 1060-XP con 400 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 400 μm se observa casi completamente constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er, 2do y 3er picos son más estables CTT al inicio y al final, pero en el 4to pico CTT al inicio. También con la profundidad es casi completamente constante, ya que para el 1er, 2do y 3er picos son más estables STT, pero en el 4to pico es CTT al inicio y al final. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er pico se mantiene más estable en verano, el 2do pico en primavera y verano, el 3er en primavera y el 4to en otoño. La profundidad es casi completamente constante, en el 2do, 3er y 4to picos se mantienen más estables en invierno, y el 1er pico en verano.

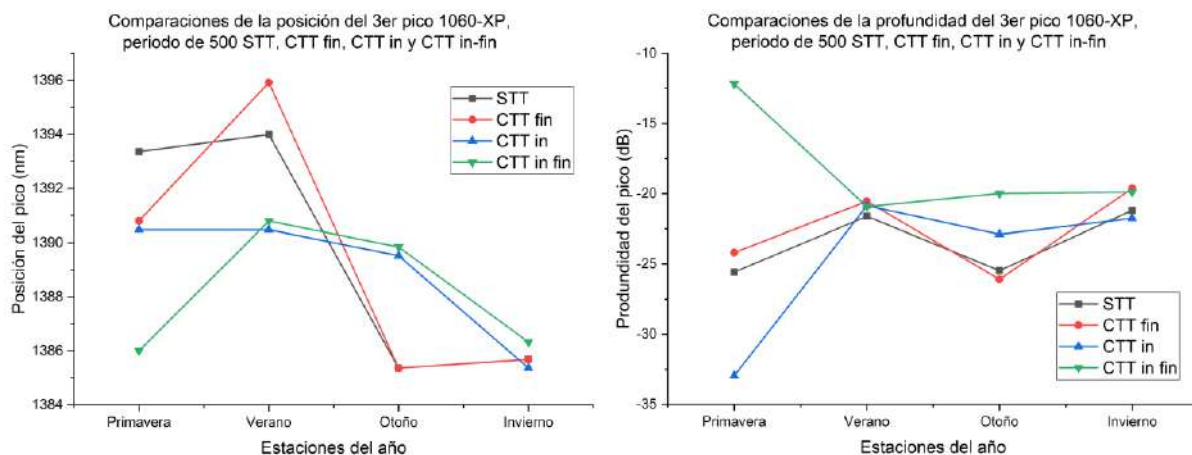


Figura 36. RPL en fibra 1060-XP con 500 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 500 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er pico es más estable STT, en el 2do pico CTT al inicio y el 3er CTT al inicio y al final. Con la profundidad casi es completamente constante, ya que para el 1er y 3er picos son más estables STT, pero en el 2do pico es CTT al inicio. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición es casi completamente constante, para el 2do y 3er picos se mantienen más estable en invierno, pero para el 1er pico en primavera. La profundidad también es casi completamente constante, en el 1er y 3er picos se mantienen más estables en verano, pero el 2do pico en otoño.

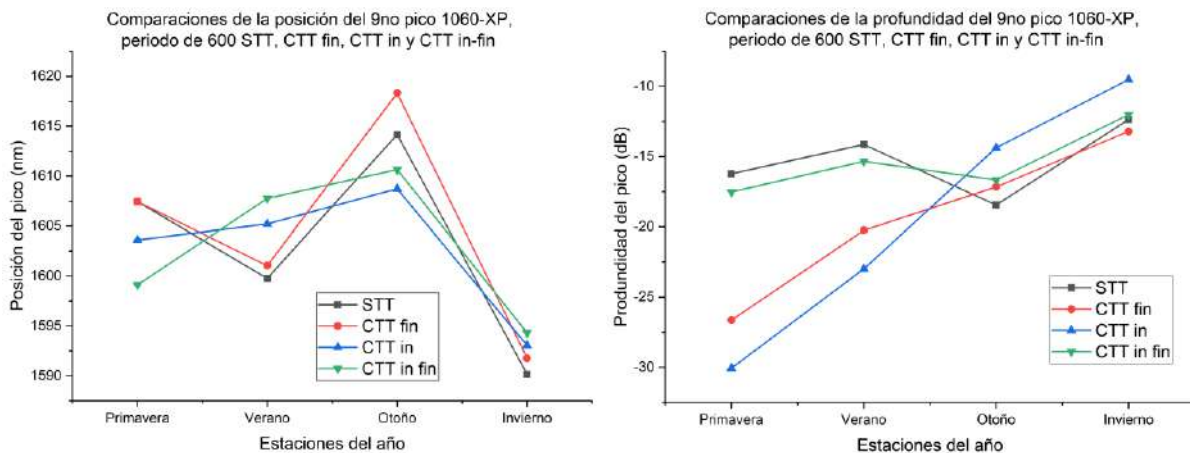


Figura 37. RPL en fibra 1060-XP con 600 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 600 μm no se observa constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er, 2do, 3er, 5to, 6to y 7mo picos son más estables STT, en el 4to pico STT y CTT al inicio y al final, en el 8vo CTT al inicio y al final, y el 9no CTT al inicio. Tampoco la profundidad es constante, ya que para el 1er pico es más estable CTT al final, el 2do STT, el 3er, 4to y 9no CTT al inicio y al final, el 5to, 6to, 7mo y 8vo CTT al inicio. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición no es constante, para el 1er y 2do picos se mantienen más estables en otoño, cabe señalar que en el caso del 1er pico es exactamente la misma posición, el 3er y 8vo en otoño e invierno, el 4to, 5to, 6to, 7mo y 9no en invierno. Tampoco la profundidad es constante, en el 1er, 3er, 4to, 5to y 6to picos se mantienen más estables en primavera, el 2do y 7mo en verano, el 8vo en invierno y el 9no en otoño.

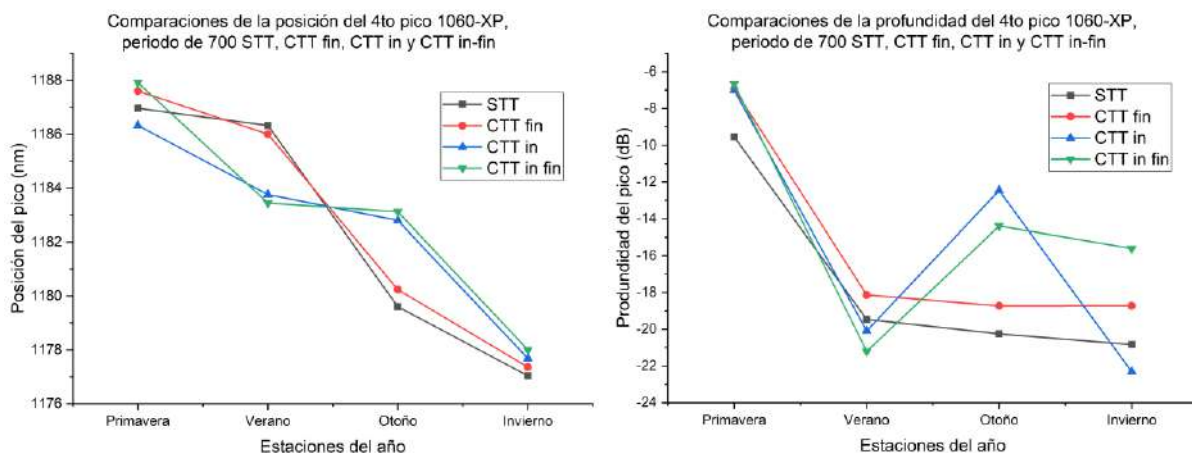


Figura 38. RPL en fibra 1060-XP con 700 μm de periodo. Posición del pico (nm) y profundidad del pico (dB) en las 4 estaciones del año, de las RPL sin tratamiento térmico (curvas negras), con tratamiento térmico al final (curvas rojas), con tratamiento térmico al inicio (curvas azules) y con tratamiento térmico al inicio y final (curvas verdes).

Con un periodo de 700 μm se observa casi completamente constante la posición de los picos durante las cuatro estaciones del año, ya que el 1er, 2do, 3er, 5to y 6to picos son más estables CTT al inicio y al final, pero en el 4to y 7mo picos CTT al inicio. La profundidad no es constante, ya que para el 1er, 2do y 3er picos son más estables CTT al inicio, el 4to y 5to STT, el 6to y 7mo CTT al final. Al comparar en la misma estación del año, pero con diferentes tratamientos, en el caso de la posición es casi completamente constante, para el 1er, 2do, 3er, 4to, 6to y 7mo picos se mantienen más estables en invierno, pero para el 5to pico en primavera. La profundidad no es constante, en el 1er pico se mantiene más estable en otoño, el 2do, 3er, 4to y 5to en primavera, el 6to y 7mo en verano.

III.5.4 Análisis

Se pudo observar que al acomodar las gráficas de esta manera se pudo comparar mejor la posición del pico (nm) y la profundidad del pico (dB) en las diferentes estaciones del año. Se logró mantener la posición de los picos, pero también se observó que, dependiendo la estación, aparecen otros picos de atenuación. No se mantiene la misma profundidad en las distintas estaciones del año y por lo tanto no es el mismo número de periodos registrados en cada RPL fabricada (Ver ANEXO A, ANEXO B y ANEXO C).

Podemos observar que el pre-post tratamiento térmico en algunos casos puede ser un medio para ajustar la posición y la profundidad, y en otros se observa que no produce ningún cambio.

Como aplicación para las RPL con pre-post tratamiento térmico, se decidió hacer pruebas de alta temperatura, por lo que se escogió una RPL de 600 μm con 52 periodos, fabricada en fibra 1060-XP, con tratamiento térmico al inicio y al final, para hacerle las pruebas con diferentes temperaturas (de temperatura ambiente a 900 °C). En la Figura 39 se pueden observar los espectros obtenidos de cada medición con diferentes temperaturas.

Mediciones a diferentes temperaturas, RPL de 600 μ m, fibra 1060-XP

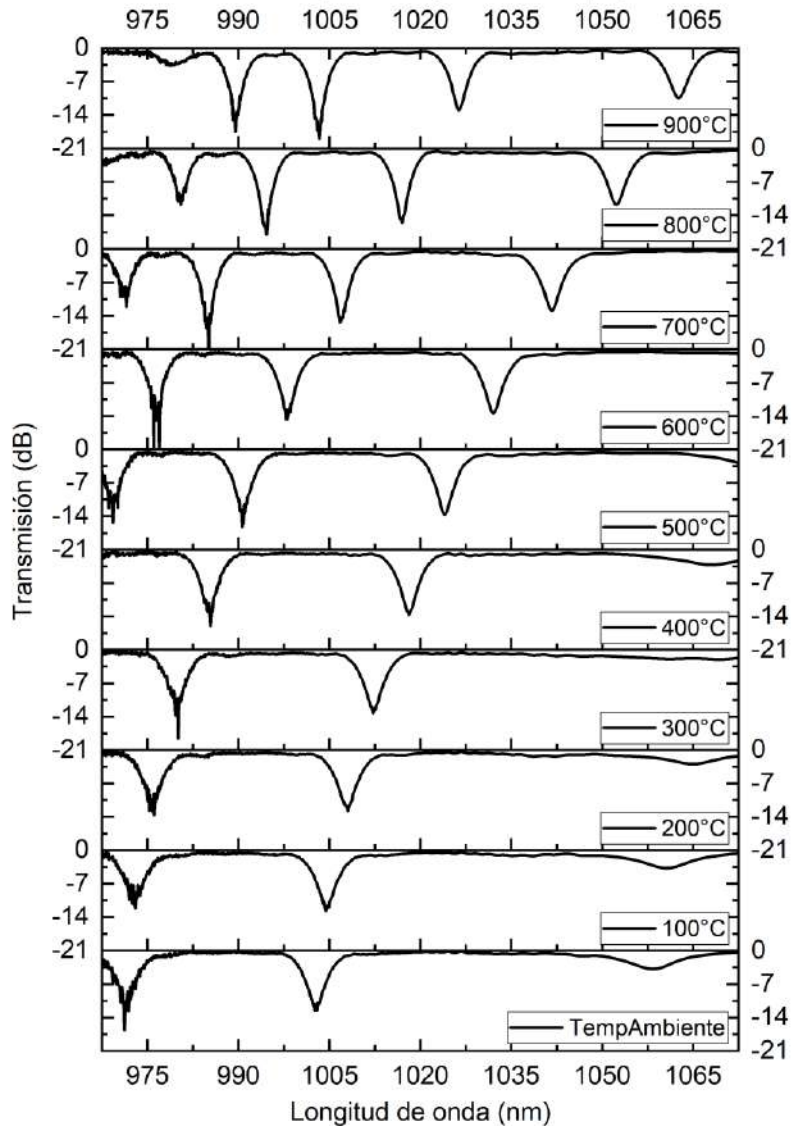


Figura 39. Mediciones de temperatura (temperatura ambiente a 900 °C) en una RPL de 600 μ m con 52 periodos, grabada en fibra 1060-XP, con tratamiento térmico al inicio y al final.

Se puede observar un desplazamiento hacia la derecha en la longitud de onda (posición) al ir aumentando la temperatura, cabe mencionar que se llegó hasta 900°C porque era el máximo de temperatura que se podía medir en el horno que se utilizó, pero consideramos que se pueden hacer pruebas con mayor temperatura sin que se dañe la RPL. Con estos resultados podemos observar que la RPL es resistente a altas temperaturas sin que se borre.

IV. CONCLUSIONES

En esta tesis se estudió el desarrollo de RPL en Fibra Óptica (980-HP, 1060-XP y SMF-28) usando como fuente de calor para su fabricación un láser de CO₂. Para su fabricación se usó principalmente una procesadora de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL), desarrollando las rutinas de acuerdo a las características deseadas de las RPL.

Se observó una discrepancia entre las posiciones de las longitudes de onda de resonancia que se calcularon con la Ecuación 1 y los valores obtenidos experimentalmente, pueden atribuirse a las incertidumbres y aproximaciones que fueron empleadas en las simulaciones. Como, por ejemplo, se asume que el perfil del índice de refracción es un índice escalonado, mientras que en la fibra real tiene una variación más gradual, con un orificio pronunciado en el centro, que también depende de la longitud de onda (Yablon, 2010). Otra razón, puede ser que la medición del tamaño del núcleo de la fibra con el microscopio SEM nos arrojó un diámetro de 8.4 μm , y el valor nominal del fabricante es de 8.3 μm . También podría ser, las condiciones ambientales durante la fabricación, se lograría una mejor correspondencia si la fabricación se realiza bajo condiciones controladas de humedad y temperatura. No obstante, la posición de las longitudes de onda de resonancia y sus respectivos patrones de modo transversal concuerdan estrechamente.

Se presentó la caracterización de la sensibilidad de las RPL inducidas por láser de CO₂ a perturbaciones externas como temperatura, curvatura, tensión y la aplicación a mediciones de la proporción de glicerina en agua destilada y la proporción de gasolina en alcohol. Las RPL se fabricaron mediante un procedimiento automatizado en un sistema de procesamiento de vidrio con láser de CO₂ (LZM-100 de AFL). Se obtuvo que las perturbaciones periódicas eran simétricas, con una contribución geométrica que correspondía a un adelgazamiento del revestimiento de la fibra y la difusión de los dopantes en el núcleo de la fibra.

En cuanto a la caracterización y aplicación de las RPL, la periodicidad seleccionada fue de 700 μm , esto se debe a que la profundidad de los dos picos observados fue pequeña. El uso de picos de pequeña profundidad (2-3 dB) permite realizar mediciones con el analizador de espectro óptico (OSA) sin tener problemas con el rango dinámico.

Las sensibilidades a temperatura, curvatura y tensión de la RPL fueron de $101.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $-17.74 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ y $-1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$, respectivamente. Asimismo, la aplicación de RPL para la medición de mezclas gasolina en alcohol resultó en una sensibilidad de $514 \text{ pm}/\%$ de gasolina en alcohol. Todas estas sensibilidades son comparables con las RPL fabricados con otros métodos de última generación.

La simulación de la respuesta de la RPL con cambios en el índice externo se realizó teniendo en cuenta el hecho de que, en la cintura de la región micro-adelgazada de cada periodo individual, el núcleo se expande en tamaño por difusión, y el diámetro del revestimiento se reduce. Hubo una buena concordancia entre los resultados experimentales y simulados, sin embargo, deben tenerse en cuenta otros factores para lograr una mejor coincidencia.

Las rápidas variaciones espectrales producidas por cambios en el índice de refracción externo en la longitud de onda de resonancia, nos permite consideraciones relacionadas con una aplicación específica y podrían ser consideradas para propósitos de empaque.

Se fabricaron RPL con pre-post tratamiento térmico en las diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) para observar su comportamiento en profundidad y posición. Se pudo observar que al acomodar las gráficas de la manera en que se hizo, se pudo comparar mejor la posición del pico (nm) y la profundidad del pico (dB) en las diferentes estaciones del año. Se logró mantener la posición de los picos, pero también se observó que, dependiendo la estación, aparecen otros picos de atenuación. No se mantiene la misma profundidad en las distintas estaciones del año y por lo tanto no es el mismo número de periodos registrados en cada RPL fabricada.

Se observó que el pre-post tratamiento térmico en algunos casos puede ser un medio para ajustar la posición y la profundidad, y en otros se observa que no produce ningún cambio.

Se observó que la RPL de $600 \mu\text{m}$ con 52 periodos, fabricada en fibra 1060-XP, con tratamiento térmico al inicio y al final, es resistente a altas temperaturas sin que se borre, lo que abre un campo de aplicaciones, tanto para sensores como para láseres de alta potencia, por ejemplo.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allsop, T., Carroll, K., Webb, D., Bennion, I., & Miller, M. (2007). The Application of a Long Period Grating Sensors to Human Respiratory Plethysmography. *Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications III*, 6631.
- Almeida, T., Oliveira, R., André, P., Rocha, A., Facão, M., & Nogueira, R. (2017). Automated technique to inscribe reproducible long-period gratings using a CO2 laser splicer. *Optics Letter*, 42(10), 1994-1997.
- Bai, Z., Zhang, W., Gao, S., Zhang, H., Wang, L., & Liu, F. (2015). Bend-insensitive long period fiber grating-based high temperature sensor. *Optical Fiber Technology*, 21, 110-114.
- Bhaumik, S. (2017). *Effect of humidity of drawing environment on dynamic fatigue of polymer coated high strength silica optical fiber*. Sterlite Tech.
- Coelho, J., Nespereira, M., Abreu, M., & Rebordão, J. (2013). 3D Finite Element Model for Writing Long-Period Fiber Gratings by CO2 Laser Radiation. *Sensors*, 13(8), 10333-10347.
- Coelho, J., Silva, C., Nespereira, M., Abreu, M., & Rebordão, J. (2015). *Writing of Long Period Fiber Gratings Using CO2 Laser Radiation, Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*. doi:10.5772/59153
- Davis, D., Gaylord, T., Glytsis, E., Kosinski, S., Mettler, S., & Vengsarkar, A. (1998). Long-period fibre grating fabrication with focused CO2 laser pulses. *Electronics Letters*, 34(3), 302-303.
- Du, W., Tam, H., Liu, M., & Tao, X. (1998). Long-period fiber grating bending sensors in laminated composite structures. *Sensory Phenomena and Measurements Instrumentation for Smart Structures and Materials*, 3330.
- Falate, R., Kamikawachi, R., Muller, M., Kalinowski, H., & Fabris, J. (2005). Fiber optic sensors for hydrocarbon detection. *Sensors and Actuators B*, 105(2), 430-436.

- Fernandes, C., Rocco Giraldi, M., de Sousa, M., Costa, J., Gouveia, C., Jorge, P., & Franco, M. (2016). Curvature and Vibration Sensing Based on Core Diameter Mismatch Structures. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(9), 2120-2128.
- Huang,, Y., Zhou, Z., Zhang, Y., Chen, G., & Xiao, H. (2010). A Temperature Self-Compensated LPFG Sensor for Large Strain Measurements at High Temperature. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(11), 2997-3004.
- Humbert, G., & Malki, A. (2002). Characterizations at very high temperature of electric arc-induced long-period fiber gratings. *Optics communications*, 208, 329-335.
- Hutsel, M. R., & Gaylord, T. (2012). Residual-stress relaxation and densification in CO₂-laser-induced long-period fiber gratings. *Journal of Applied Optics*, 51(25), 6179-6187.
- Jung, H., Shin, W., Kim, J., Park, S.-H., Ko, D.-K., Lee, J., & Oh, K. (2009). Bending and Strain Sensitivities in a Helicoidal Long-Period Fiber Gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(17), 1232-1234.
- Lai, M., Lim, K., Gunawardena, D., Lee, Y., & Ahmad, H. (2017). CO₂ Laser Applications in Optical Fiber Components Fabrication and Treatment: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 17(10), 2961-2974.
- Lin, C.-Y., Wang, L., & Chern, G.-W. (2001). Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 19(8), 1159-1168.
- Liu, Z., Liu, Y., Mou, C., Zou, F., & Wang, T. (2018). CO₂ laser-written long-period fiber grating with a high diffractive order cladding mode near the turning point. *Applied Optics*, 57(17), 4756-4760.
- Lu, P., Hsu, K., Jyu, S., & Lai, Y. (2010). Periodically tapered long-period fiber gratings by CO₂ laser heating and tension stretching. *OECC 2010 Technical Digest*, 626-627.
- Monteiro-Silva, F., Santos, J., de Almeida, J., & Coelho, L. (2018). Quantification of Ethanol Concentration in Gasoline Using Cuprous Oxide Coated Long Period Fiber Gratings. *IEEE Sensors Journal*, 18(4), 1493-1500.

- Ni, W., Lu, P., Fu, X., Wang, S., Sun, Y., Liu, D., & Zhang, J. (2017). Highly Sensitive Optical Fiber Curvature and Acoustic Sensor Based on Thin Core Ultralong Period Fiber Grating. *IEEE Photonics Journal*, 9(2), 1-9.
- Park, B., Kim, J., Eom, T., Lee, B., & Paek, U.-C. (2005). Sensing characteristics of long-period fiber gratings in photonic crystal fiber imprinted by CO₂ laser. *Optical Fiber Communication*.
- Patrick, H., Chang, C., & Vohra, S. (1998). Long period fibre gratings for structural bend sensing. *Electronics Letters*, 34(18), 1773-1775.
- Patrick, H., Kersey, A., & Bucholtz, F. (1998). Analysis of the response of Long Period Fiber Gratings to External Index of Refraction. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 16(9), 1606-1612.
- Petrović, M., Petrovic, J., Daničić, A., Vukčev, M., Bojović, B., Hadžievski, L., . . . Webb, D. (2014). Non-invasive respiratory monitoring using long-period fiber grating sensors. *Biomedical Optics Express*, 5(4), 1136-1144.
- Porraz-Culebro, T., Martinez-Rios, A., Toral-Acosta, D., Madrazo-de-la-Rosa, K., Enriquez-Gomez, L., Sierra-Hernandez, J., & Salceda-Delgado, G. (2019). Characteristics of LPPFGs written by a CO₂-laser glass processing system. *Journal of Lightwave Technology*, 37(4), 1301-1309.
- Pospori, A., Marques, C., Bang, O., Webb, D., & Andre, P. (2017). Polymer optical fiber Bragg grating inscription with a single UV laser pulse. *Optics express*, 25(8), 9028-9038.
- Shu, X., Zhang, L., & Bennion, I. (2002). Sensitivity Characteristics of Long-Period Fiber Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, 20(2), 255-266.
- Vengsarkar, A., Lemaire, P., Judkins, J., Bhatia, V., Erdogan, T., & Sipe, J. (1996). Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. *Journal of Lightwave Technology*, 14(1), 58-65.

- Wang, Q., Sang, M., Zhong, C., & Dong, J. (2017). Refractive index and curvature sensitivity of LPFG inscribed in few-modes fiber. *Fiber Optic Sensing and Optical Communications*.
- Wang, Y. (2010). Review of long period fiber gratings written by CO2 laser. *Journal of Applied Physics*, 108(8), 1-18.
- Xu, X., Tang, J., Zhao, J., Yang, K., Fu, C., Wang, Q., . . . Wang, Y. (2015). Post-Treatment Techniques for Enhancing Mode-Coupling in Long Period Fiber Gratings Induced by CO2 Laser. *Photonic Sensors*, 5(4), 339-344.
- Yablon, A. (2010). Multi-Wavelength Optical Fiber Refractive Index Profiling by Spatially Resolved Fourier Transform Spectroscopy. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 360-364.
- Yin, G., Tang, J., Liao, C., & Wang, Y. (2016). Automatic arc discharge technology for inscribing long period fiber gratings. *Applied Optics*, 55(14), 3873-3878.
- Zheng, W. (2016). Fabrication of long period fiber gratings with CO2 laser fusion splicers. *IEEE Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 1-4.
- Zhu, Y., Shum, P., Bay, H., Yan, M., Yu, X., & Hu, J. (2005). Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber. *Optics letters*, 30(4), 367-369.

ANEXO A

Comparación “RPL en fibra SMF-28, fabricadas en primavera, verano, otoño e invierno”

Periodo	Primavera				Verano				Otoño				Invierno			
	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)
500	TT inicio y 72*	1er	1413.08	-16.369	TT inicio y 56*	1er	1412.24	-18.087	TT inicio y 28*	1er	1415.6	-15.136	TT inicio y 48*	1er	1407.44	-24.456
		2do	1535.24	-22.805		2do	1535.72	-29.77		2do	1541.6	-27.15		2do	1530.56	-26.485
	TT inicio y 76	1er	1412.84	-13.233	TT inicio y 60	1er	1412.12	-12.822	TT inicio y 32	1er	1414.04	-11.18	TT inicio y 52	1er	1407.8	-17.021
		2do	1535.12	-19.798		2do	1535.6	-17.687		2do	1539.8	-15.191		2do	1529.96	-22.327
TT inicio, 76 y TT final	1er	1412.84	-13.291	TT inicio, 60 y TT final	1er	1412	-12.783	TT inicio, 32 y TT final	1er	1413.44	-10.82	TT inicio, 52 y TT final	1er	1407.08	-16.916	
	2do	1535.24	-19.854		2do	1535.48	-17.689		2do	1539.32	-15.032		2do	1529.6	-22.564	
600	TT inicio y 44*	1er	1473.32	-2.785	TT inicio y 88*	1er	1524.56	-11.111	TT inicio y 20*	1er	1476.2	-5.103	TT inicio y 56*	1er	1474.28	-5.958
		2do	1524.8	-11.567		2do	1618.16	-18.349		2do	1529.6	-26.848		2do	1525.04	-29.638
		3er	1618.64	-27.624		3er	1646.36	-5.321		3er	1620.92	-7.073		3er	1617.68	-14.975
	TT inicio y 48	1er	1473.8	-3.565	TT inicio y 92	1er	1524.32	-10.614	TT inicio y 24	1er	1477.64	-7.851	TT inicio y 60	1er	1474.4	-7.009
		2do	1524.92	-18.157		2do	1618.64	-15.704		2do	1528.4	-10.366		2do	1525.64	-22.603
		3er	1618.4	-17.684		3er	1646.48	-6.749		3er	1621.76	-3.115		3er	1617.92	-11.109
TT inicio, 48 y TT final	1er	1473.92	-3.58	TT inicio, 92 y TT final	1er	1523.84	-10.704	TT inicio, 24 y TT final	1er	1477.76	-7.721	TT inicio, 60 y TT final	1er	1473.56	-7.349	
	2do	1525.16	-17.911		2do	1618.52	-15.26		2do	1528.4	-10.563		2do	1524.8	-23.546	
	3er	1618.4	-17.056		3er	1646	-6.712		3er	1620.8	-3.149		3er	1617.56	-11.769	
650	TT inicio y 68*	1er	1529.24	-3.947	TT inicio y 80*	1er	1445.6	-2.954	TT inicio y 24*	1er	1421.36	-2.388	TT inicio y 68*	1er	1528.4	-4.659
		2do	1591.88	-29.242		2do	1528.4	-3.983		2do	1532.36	-6.766		2do	1591.04	-25.969
		-	-	-		3er	1591.16	-20.547		3er	1608.08	-29.305		-	-	-
	TT inicio y 72	1er	1529.12	-4.43	TT inicio y 84	1er	1446.92	-2.814	TT inicio y 28	1er	1415.6	-3.209	TT inicio y 72	1er	1528.4	-4.642
		2do	1591.76	-20.554		2do	1528.52	-4.298		2do	1449.8	-3.604		2do	1590.92	-25.071
		-	-	-		3er	1591.16	-19.149		3er	1535.6	-8.567		-	-	-
		-	-	-		-	-	-		4to	1605.44	-17.194		-	-	-
	TT inicio, 72 y TT final	1er	1528.52	-3.591	TT inicio, 84 y TT final	1er	1446.32	-2.779	TT inicio, 28 y TT final	1er	1415.72	-3.236	TT inicio, 72 y TT final	1er	1528.4	-4.659
		2do	1591.04	-23.954		2do	1529.12	-3.916		2do	1448.84	-3.607		2do	1591.04	-25.969
		-	-	-		3er	1591.76	-23.985		3er	1534.52	-8.527		-	-	-
		-	-	-		-	-	-		4to	1604.96	-15.768		-	-	-
	700	TT inicio y 52	1er	1419.8	-1.01	TT inicio y 112	1er	1412.48	-4.019	TT inicio y 52*	1er	1415.72	-2.74	TT inicio y 84	1er	1411.28
2do			1587.08	-2.519	2do		1584.56	-4.949	2do		1428.2	-2.8	2do		1584.2	-3.68
3er			1638.08	-3.166	3er		1629.44	-12.7	3er		1493.84	-3.058	3er		1625.72	-6.023
-			-	-	-		-	-	4to		1594.52	-25.132	-		-	-
TT inicio y 56*		1er	1418.36	-1.178	TT inicio y 116*	1er	1412.48	-4.193	TT inicio y 56	1er	1417.28	-3.143	TT inicio y 88*	1er	1411.16	-2.976
		2do	1587.32	-2.817		2do	1584.56	-5.444		2do	1429.52	-2.938		2do	1583.96	-3.918
		3er	1638.92	-3.681		3er	1630.28	-14.43		3er	1494.8	-3.513		3er	1626.08	-6.869
		-	-	-		-	-	-		4to	1594.64	-16.502		-	-	-
TT inicio y 56*		1er	1418.84	-1.209	TT inicio y 56*	1er	1412.72	-4.222	TT inicio y 56*	1er	1415.6	-2.954	TT inicio, 88 y TT final	1er	1411.16	-2.959
		2do	1587.2	-2.861		2do	1584.44	-5.435		2do	1428.08	-2.915		2do	1583.36	-3.706

	TT inicio, 56 y TT final	3er	1638.44	-3.736	TT inicio, 116 y TT final	3er	1629.8	-14.977	TT inicio, 56 y TT final	3er	1494.8	-3.369		3er	1626.32	-6.991
		-	-	-		-	-	-		4to	1593.92	-16.694		-	-	-

*El pico con mayor profundidad

Tabla 1. Valores obtenidos de las RPL fabricadas en fibra SMF-28.

ANEXO B

Comparación “RPL en fibra 980-HP, fabricadas en primavera, verano, otoño e invierno”

Periodo	Primavera				Verano				Otoño				Invierno			
	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)
300 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 104*	1er	1229.2	-1.888	STT al inicio y 120*	1er	1228.88	-2.176	STT al inicio y 120*	1er	1227.6	-1.75	STT al inicio y 156*	1er	1228.88	-2.777
		2do	1261.2	-3.979		2do	1261.2	-4.827		2do	1259.92	-4.127		2do	1261.2	-5.54
		3er	1309.52	-8.853		3er	1309.84	-13.348		3er	1307.92	-9.487		3er	1309.2	-13.449
		4to	1381.84	-29.89		4to	1382.16	-20.934		4to	1380.88	-18.3		4to	1382.16	-21.889
		5to	1509.52	-19.208		5to	1508.56	-15.254		5to	1507.28	-21.648		5to	1507.28	-19.519
	STT al inicio y 108	1er	1228.88	-1.956	STT al inicio y 124	1er	1229.2	-2.283	STT al inicio y 124	1er	1227.92	-1.828	STT al inicio y 160	1er	1228.88	-2.893
		2do	1261.52	-4.245		2do	1261.2	-5.166		2do	1259.92	-4.324		2do	1261.2	-5.681
		3er	1309.52	-9.859		3er	1309.84	-14.264		3er	1307.92	-10.087		3er	1309.2	-13.68
		4to	1381.84	-19.366		4to	1382.8	-17.88		4to	1380.56	-18.364		4to	1382.16	-20.832
		5to	1509.84	-18.005		5to	1509.2	-20.3		5to	1507.6	-20.8		5to	1507.6	-20.872
	108 y TT al final	1er	1229.52	-2.208	124 y TT al final	1er	1228.88	-1.668	124 y TT al final	1er	1227.28	-1.945	160 y TT al final	1er	1228.88	-2.27
		2do	1261.52	-4.526		2do	1261.2	-3.236		2do	1259.6	-4.474		2do	1260.88	-5.126
		3er	1309.84	-10.387		3er	1310.48	-6.12		3er	1307.6	-10.511		3er	1309.2	-14.197
		4to	1381.84	-24.244		4to	1380.24	-16.324		4to	1380.24	-17.578		4to	1382.8	-20.063
		5to	1510.16	-23.203		5to	1508.56	-17.73		5to	1507.92	-20.33		5to	1508.24	-21.803
300 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 108*	1er	1237.84	-3.049	TT al inicio y 132*	1er	1229.52	-1.89	TT al inicio y 112*	1er	1228.24	-3.649	TT al inicio y 120*	1er	1227.6	-1.888
		2do	1269.84	-5.642		2do	1261.52	-4.212		2do	1263.76	-4.727		2do	1259.6	-3.42
		3er	1319.44	-11.904		3er	1310.16	-11.261		3er	1311.12	-9.09		3er	1307.6	-8.87
		4to	1394	-19.913		4to	1383.44	-20.128		4to	1383.44	-11.278		4to	1380.24	-21.156
		5to	1527.44	-18.627		5to	1511.12	-14.494		5to	1517.2	-16.222		5to	1507.28	-28.808
	TT al inicio y 112	1er	1237.84	-3.314	TT al inicio y 136	1er	1229.52	-1.911	TT al inicio y 116	1er	1228.56	-3.677	TT al inicio y 124	1er	1227.6	-1.973
		2do	1270.48	-6.3		2do	1261.52	-4.488		2do	1264.4	-4.809		2do	1259.92	-3.621
		3er	1319.76	-13.72		3er	1310.16	-12.025		3er	1311.12	-9.668		3er	1307.6	-9.635
		4to	1393.68	-19.942		4to	1383.12	-18.84		4to	1383.44	-12.184		4to	1380.56	-20.91
		5to	1527.44	-18.077		5to	1511.44	-16.35		5to	1517.2	-15.711		5to	1507.6	-21.807
	TT al inicio, 112 y TT al final	1er	1238.16	-3.309	TT al inicio, 136 y TT al final	1er	1229.2	-1.857	TT al inicio, 116 y TT al final	1er	1228.56	-2.25	TT al inicio, 124 y TT al final	1er	1227.6	-1.769
		2do	1270.16	-6.289		2do	1261.52	-4.382		2do	1262.48	-3.473		2do	1259.6	-3.456
		3er	1319.76	-13.602		3er	1310.16	-11.908		3er	1310.48	-7.802		3er	1307.92	-9.675
		4to	1394	-25.127		4to	1383.12	-14.865		4to	1384.08	-11.677		4to	1380.24	-22.364
		5to	1528.4	-20.569		5to	1511.44	-15.048		5to	1516.56	-11.389		5to	1507.92	-21.889
400 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 52*	1er	1347.6	-1.527	STT al inicio y 76*	1er	1339.6	-1.696	STT al inicio y 64*	1er	1337.68	-1.764	STT al inicio y 76*	1er	1335.12	-1.957
		2do	1380.24	-4.767		2do	1376.72	-2.142		2do	1373.2	-3.427		2do	1371.6	-2.478
		3er	1429.52	-12.364		3er	1424.4	-7.193		3er	1421.52	-8.135		3er	1418.64	-7.224
		4to	1514.96	-29.555		4to	1511.44	-25.327		4to	1505.04	-24.154		4to	1503.76	-30.09
	STT al inicio y 56	1er	1347.28	-1.721	STT al inicio y 80	1er	1339.92	-1.92	STT al inicio y 68	1er	1338.32	-1.875	STT al inicio y 80	1er	1334.16	-2.065
		2do	1380.56	-5.313		2do	1376.72	-2.393		2do	1373.84	-3.714		2do	1371.28	-2.659
		3er	1430.16	-15.77		3er	1424.4	-8.503		3er	1421.52	-9.349		3er	1418.64	-8.107

	56 y TT al final	4to	1515.6	-26.235	80 y TT al final	4to	1511.12	-19.575	68 y TT al final	4to	1504.72	-21.411	80 y TT al final	4to	1503.44	-21.758	
		1er	1349.84	-1.167		1er	1339.92	-1.875		1er	1338	-1.844		1er	1334.8	-1.968	
		2do	1382.16	-3.857		2do	1376.72	-2.424		2do	1373.52	-3.625		2do	1371.28	-2.467	
		3er	1434	-7.032		3er	1424.72	-8.338		3er	1421.2	-9.514		3er	1419.28	-8.174	
		4to	1521.36	-9.626		4to	1511.12	-21.094		4to	1505.36	-21.013		4to	1504.08	-19.794	
400 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 56*	1er	1346	-1.575	TT al inicio y 80*	1er	1339.92	-1.934	TT al inicio y 64*	1er	1341.2	-1.521	TT al inicio y 68*	1er	1335.44	-1.564	
		2do	1380.24	-4.311		2do	1376.4	-1.751		2do	1373.2	-4.478		2do	1370.64	-3.135	
		3er	1429.84	-11.179		3er	1424.4	-7.795		3er	1421.52	-11.538		3er	1418.96	-8.826	
		4to	1515.28	-30.62		4to	1511.44	-21.945		4to	1505.68	-22.962		4to	1502.48	-22.492	
	TT al inicio y 60	1er	1346.32	-1.719	TT al inicio y 84	1er	1339.92	-2.104	TT al inicio y 68	1er	1339.6	-1.682	TT al inicio y 72	1er	1335.44	-1.683	
		2do	1380.24	-4.935		2do	1377.04	-1.947		2do	1373.52	-5.208		2do	1371.28	-3.475	
		3er	1429.84	-14.427		3er	1424.4	-8.535		3er	1421.84	-14.027		3er	1418.96	-10.552	
		4to	1515.6	-20.784		4to	1511.12	-18.232		4to	1505.36	-18.191		4to	1502.8	-16.655	
	TT al inicio, 60 y TT al final	1er	1346	-1.522	TT al inicio, 84 y TT al final	1er	1339.92	-2.135	TT al inicio, 68 y TT al final	1er	1336.4	-1.671	TT al inicio, 72 y TT al final	1er	1335.12	-1.522	
		2do	1379.92	-4.745		2do	1376.4	-2.042		2do	1373.52	-4.751		2do	1370.96	-3.314	
		3er	1430.16	-14.177		3er	1424.72	-8.833		3er	1421.52	-15.454		3er	1418.96	-11.693	
		4to	1515.6	-32.024		4to	1511.76	-18.031		4to	1505.68	-16.63		4to	1503.44	-17.413	
500 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 40*	1er	1444.56	-2.217	STT al inicio y 56*	1er	1440.4	-2.525	STT al inicio y 52*	1er	1434.64	-3.131	STT al inicio y 48*	1er	1434	-3.027	
		2do	1485.52	-6.206		2do	1481.36	-8.18		2do	1474.64	-6.574		2do	1472.4	-5.387	
		3er	1563.92	-24.83		3er	1561.36	-16.548		3er	1555.6	-22.601		3er	1551.76	-22.613	
	STT al inicio y 44	1er	1445.52	-2.54	STT al inicio y 60	1er	1440.72	-2.794	STT al inicio y 56	1er	1434.64	-3.381	STT al inicio y 52	1er	1433.04	-3.216	
		2do	1485.2	-7.178		2do	1480.72	-9.541		2do	1475.28	-7.343		2do	1473.04	-6.04	
		3er	1564.56	-19.788		3er	1562	-19.084		3er	1556.56	-29.222		3er	1551.44	-27.913	
	44 y TT al final	1er	1444.24	-1.834	60 y TT al final	1er	1440.72	-2.781	56 y TT al final	1er	1435.28	-3.238	52 y TT al final	1er	1433.68	-2.74	
		2do	1485.2	-6.429		2do	1480.72	-9.589		2do	1475.28	-7.811		2do	1473.68	-6.209	
		3er	1565.2	-23.358		3er	1562	-21.403		3er	1556.24	-27.826		3er	1552.4	-23.76	
	500 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 40*	1er	1444.56	-2.085	TT al inicio y 52*	1er	1439.76	-2.059	TT al inicio y 52*	1er	1434.32	-2.481	TT al inicio y 56*	1er	1435.28	-3.077
			2do	1486.48	-6.478		2do	1480.08	-6.728		2do	1474.96	-6.791		2do	1475.28	-6.765
			3er	1563.92	-19.581		3er	1560.72	-29.265		3er	1555.92	-24.466		3er	1555.6	-26.485
TT al inicio y 44		1er	1445.84	-2.468	TT al inicio y 56	1er	1439.12	-2.317	TT al inicio y 56	1er	1434.32	-2.754	TT al inicio y 60	1er	1436.56	-3.386	
		2do	1485.2	-7.248		2do	1480.08	-8.354		2do	1474.64	-7.992		2do	1475.28	-7.361	
		3er	1564.24	-25.441		3er	1560.08	-21.117		3er	1555.6	-20.671		3er	1555.92	-20.597	
TT al inicio, 44 y TT al final		1er	1445.52	-2.168	TT al inicio, 56 y TT al final	1er	1439.12	-2.228	TT al inicio, 56 y TT al final	1er	1434.64	-2.702	TT al inicio, 60 y TT al final	1er	1436.56	-3.21	
		2do	1486.16	-6.935		2do	1479.76	-8.269		2do	1474.96	-8.573		2do	1475.28	-7.955	
		3er	1564.24	-22.083		3er	1561.04	-26.518		3er	1556.24	-32.093		3er	1556.88	-17.68	
600 (STT al inicio y CTT al final)		STT al inicio y 40*	1er	1290.32	-1.387	STT al inicio y 48*	1er	1283.6	-1.363	STT al inicio y 60*	1er	1282.96	-3.016	STT al inicio y 40*	1er	1281.36	-1.233
			2do	1334.48	-1.559		2do	1328.08	-1.626		2do	1326.16	-2.873		2do	1325.84	-1.431
			3er	1412.88	-2.379		3er	1406.16	-1.999		3er	1404.56	-4.43		3er	1403.6	-2.054
	4to		1497.04	-1.122	4to		1487.12	-1.133	4to		1485.84	-4.049	4to		1484.56	-1.258	
	5to		1527.12	-8.33	5to		1517.2	-9.027	5to		1515.92	-16.032	5to		1515.28	-6.975	
	6to		1588.24	-19.076	6to		1577.36	-24.056	6to		1577.68	-23.574	6to		1574.48	-23.455	
	STT al inicio y 44	1er	1289.68	-1.602	STT al inicio y 52	1er	1283.92	-1.516	STT al inicio y 64	1er	1283.6	-3.247	STT al inicio y 44	1er	1282	-1.253	
		2do	1334.48	-1.901		2do	1328.4	-1.853		2do	1327.12	-3.092		2do	1326.16	-1.549	
		3er	1412.88	-2.731		3er	1405.2	-2.237		3er	1404.56	-4.457		3er	1403.6	-2.116	
		4to	1496.4	-1.217		4to	1487.76	-1.205		4to	1486.48	-4.105		4to	1483.92	-1.346	

	44 y TT al final	5to	1527.12	-10.38	52 y TT al final	5to	1517.84	-11.845	64 y TT al final	5to	1516.24	-20.615	44 y TT al final	5to	1514.96	-8.57
		6to	1588.24	-12.388		6to	1577.36	-22.814		6to	1577.36	-28.339		6to	1574.16	-22.234
		1er	1289.68	-1.048		1er	1283.92	-1.377		1er	1283.28	-2.622		1er	1281.68	-1.091
		2do	1334.8	-1.259		2do	1328.4	-1.654		2do	1326.8	-2.699		2do	1326.48	-1.425
		3er	1412.24	-2.151		3er	1406.16	-2.152		3er	1404.88	-4.009		3er	1403.92	-1.951
		4to	1498.32	-0.867		4to	1487.76	-1.153		4to	1486.16	-3.446		4to	1483.92	-1.112
600 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 36*	5to	1527.76	-5.934	TT al inicio y 52*	5to	1518.16	-11.521	TT al inicio y 56*	5to	1516.56	-21.113	TT al inicio y 52*	5to	1515.92	-8.177
		6to	1588.56	-23.113		6to	1577.68	-25.042		6to	1577.04	-20.967		6to	1575.44	-22.967
		1er	1290.64	-0.931		1er	1285.2	-1.453		1er	1283.28	-3.307		1er	1282.32	-2.083
		2do	1334.8	-1.253		2do	1329.68	-1.793		2do	1324.56	-3.163		2do	1325.84	-2.253
		3er	1413.84	-1.698		3er	1407.44	-2.424		3er	1403.28	-5.017		3er	1402.64	-3.405
		4to	1497.68	-0.968		4to	1490.32	-1.607		4to	1484.56	-4.105		4to	1485.84	-3.137
	TT al inicio y 40	5to	1528.72	-6.232	TT al inicio y 56	5to	1520.08	-11.085	TT al inicio y 60	5to	1515.92	-20.344	TT al inicio y 56	5to	1514.96	-13.008
		6to	1590.16	-30.493		6to	1579.6	-17.327		6to	1577.04	-19.288		6to	1576.4	-25.95
		1er	1290.32	-1.13		1er	1285.84	-1.711		1er	1282.64	-3.586		1er	1282.32	-2.273
		2do	1335.76	-1.506		2do	1329.68	-2.11		2do	1325.52	-3.547		2do	1325.84	-2.426
		3er	1413.52	-2.037		3er	1407.44	-2.756		3er	1403.28	-5.501		3er	1402.64	-3.603
		4to	1498.32	-1.161		4to	1489.68	-1.763		4to	1485.84	-4.427		4to	1484.24	-3.175
	TT al inicio, 40 y TT al final	5to	1528.4	-7.797	TT al inicio, 56 y TT al final	5to	1520.4	-16.924	TT al inicio, 60 y TT al final	5to	1516.88	-21.416	TT al inicio, 56 y TT al final	5to	1514.32	-16.609
		6to	1589.52	-13.347		6to	1580.24	-21.138		6to	1577.68	-21.331		6to	1576.72	-24.776
		1er	1290.64	-0.873		1er	1285.84	-1.735		1er	1282.96	-2.563		1er	1282.64	-1.83
		2do	1334.8	-1.253		2do	1330	-2.12		2do	1325.52	-3.407		2do	1326.48	-2.062
		3er	1413.84	-1.842		3er	1407.76	-2.748		3er	1404.24	-5.618		3er	1402.96	-3.135
		4to	1497.68	-0.979		4to	1490.32	-1.752		4to	1485.84	-3.287		4to	1484.56	-2.622
700 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 72*	5to	1528.4	-7.589	STT al inicio y 64*	5to	1520.4	-14.152	STT al inicio y 56*	5to	1517.2	-24.154	STT al inicio y 60	5to	1514.96	-18.461
		6to	1589.84	-16.47		6to	1579.92	-24.835		6to	1577.04	-16.56		6to	1576.08	-22.706
		1er	1331.6	-4.967		1er	1330.32	-2.89		1er	1326.16	-2.201		1er	1323.92	-2.009
		2do	1370	-6.466		2do	1367.44	-2.828		2do	1363.92	-2.722		2do	1361.68	-2.316
		3er	1428.56	-4.572		3er	1426.32	-3.583		3er	1425.04	-2.55		3er	1419.28	-2.824
		4to	1437.84	-4.358		4to	1434.32	-3.913		4to	1432.08	-2.751		4to	1429.52	-2.173
	STT al inicio y 76	5to	1537.04	-10.955	STT al inicio y 68	5to	1536.4	-7.552	STT al inicio y 60	5to	1531.28	-4.972	STT al inicio y 60	5to	1527.12	-4.718
		6to	1551.12	-13.34		6to	1548.56	-10.894		6to	1545.36	-8.888		6to	1540.56	-7.941
		7mo	1595.92	-20.712		7mo	1592.08	-20.615		7mo	1587.92	-21.035		7mo	1585.04	-23.777
		1er	1331.6	-5.451		1er	1330.64	-3.168		1er	1326.16	-2.502		1er	1323.92	-2.199
		2do	1370	-6.929		2do	1367.44	-2.982		2do	1363.92	-2.981		2do	1361.36	-2.512
		3er	1428.88	-5.016		3er	1426.64	-3.875		3er	1424.72	-2.766		3er	1419.28	-3.143
		4to	1437.84	-4.463		4to	1435.28	-3.892		4to	1432.08	-2.996		4to	1429.84	-2.356
	76 y TT al final	5to	1536.72	-12.368	68 y TT al final	5to	1536.72	-7.548	60 y TT al final	5to	1530.96	-5.566	60 y TT al final	5to	1527.12	-5.023
		6to	1550.8	-15.279		6to	1548.24	-12.682		6to	1545.68	-10.249		6to	1539.92	-9.305
		7mo	1596.24	-12.783		7mo	1592.08	-20.855		7mo	1588.24	-25.629		7mo	1584.72	-19.494
		1er	1331.28	-2.937		1er	1329.68	-2.75		1er	1326.48	-2.533		1er	1324.56	-2.138
		2do	1370	-3.204		2do	1367.12	-2.842		2do	1363.92	-3.069		2do	1361.68	-2.448
3er		1427.6	-2.864	3er		1426.32	-3.404	3er		1424.4	-2.689	3er		1420.24	-2.89	
	4to	1437.52	-3.721	4to	1434.96	-3.664	4to	1432.08	-2.975	4to	1430.16	-2.318				
	5to	1537.36	-9.659	5to	1536.4	-6.563	5to	1530.64	-5.58	5to	1527.12	-4.919				
	6to	1557.52	-6.868	6to	1548.56	-11.181	6to	1545.68	-10.002	6to	1540.88	-8.948				

		7mo	1589.52	-6.881			7mo	1592.08	-14.993			7mo	1588.24	-21.743			7mo	1585.04	-18.451
700 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 72*	1er	1334.8	-6.278	TT al inicio y 60*	1er	1330.32	-2.252	TT al inicio y 60*	1er	1327.12	-2.864	TT al inicio y 64*	1er	1326.48	-2.526			
		2do	1373.2	-7.284		2do	1368.08	-2.68		2do	1364.88	-3.11		2do	1364.56	-2.823			
		3er	1434.96	-4.75		3er	1428.24	-2.912		3er	1425.36	-2.936		3er	1421.2	-3.028			
		4to	1441.68	-7.855		4to	1436.56	-2.499		4to	1432.72	-2.922		4to	1433.04	-3.034			
		5to	1543.76	-13.653		5to	1535.44	-6.418		5to	1531.28	-6.087		5to	1530.32	-12.536			
		6to	1558.8	-9.824		6to	1548.56	-8.315		6to	1546.32	-9.022		6to	1542.8	-6.324			
		7mo	1605.52	-18.623		7mo	1593.36	-18.231		7mo	1588.88	-31.346		7mo	1588.24	-21.833			
	TT al inicio y 76	1er	1334.8	-6.875	TT al inicio y 64	1er	1330	-2.56	TT al inicio y 64	1er	1327.12	-3.251	TT al inicio y 68	1er	1326.48	-2.851			
		2do	1373.2	-8.098		2do	1368.08	-2.959		2do	1365.2	-3.481		2do	1364.56	-3.097			
		3er	1435.28	-5.171		3er	1427.28	-3.292		3er	1425.68	-3.076		3er	1421.52	-3.249			
		4to	1442	-8.883		4to	1436.56	-2.637		4to	1433.04	-3.198		4to	1433.04	-3.265			
		5to	1543.76	-12.256		5to	1535.12	-7.374		5to	1531.92	-6.9		5to	1530	-14.29			
		6to	1558.8	-11.604		6to	1549.2	-10.06		6to	1546.64	-10.359		6to	1543.12	-7.202			
		7mo	1606.16	-31.088		7mo	1592.72	-18.251		7mo	1588.88	-28.889		7mo	1587.92	-17.28			
	TT al inicio, 76 y TT al final	1er	1334.8	-6.768	TT al inicio, 64 y TT al final	1er	1330	-2.41	TT al inicio, 64 y TT al final	1er	1327.12	-3.066	TT al inicio, 68 y TT al final	1er	1326.8	-2.731			
		2do	1373.2	-7.637		2do	1367.76	-2.776		2do	1365.2	-3.307		2do	1364.56	-2.883			
		3er	1435.28	-4.958		3er	1427.92	-3.071		3er	1425.36	-2.904		3er	1422.16	-3.342			
		4to	1442	-8.721		4to	1436.56	-2.562		4to	1432.72	-3.231		4to	1432.72	-3.024			
		5to	1543.44	-11.136		5to	1535.44	-7.416		5to	1531.92	-6.789		5to	1530.64	-14.01			
		6to	1558.8	-11.254		6to	1549.52	-9.647		6to	1546.32	-10.472		6to	1543.76	-6.709			
		7mo	1606.16	-20.929		7mo	1593.36	-19.147		7mo	1589.2	-21.587		7mo	1588.24	-18.399			

*El pico con mayor profundidad

Tabla 2. Valores obtenidos de las RPL fabricadas en fibra 980-HP.

ANEXO C

Comparación “RPL en fibra 1060-XP, fabricadas en primavera, verano, otoño e invierno”

Periodo	Primavera				Verano				Otoño				Invierno			
	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)	# de periodos	Picos	Posición (nm)	Profundidad (dB)
300 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 48*	1er	926.48	-6.114	STT al inicio y 64*	1er	924.56	-6.365	STT al inicio y 76*	1er	923.6	-7.033	STT al inicio y 76	1er	922	-3.665
		2do	940.56	-15.409		2do	939.28	-13.396		2do	938.32	-19.773		2do	936.72	-14.032
		3er	962	-23.408		3er	960.08	-15.153		3er	959.76	-17.737		3er	957.84	-18.545
		4to	994	-21.024		4to	991.12	-19.316		4to	990.8	-18.91		4to	988.24	-19.159
		5to	1043.28	-10.581		5to	1039.44	-11.068		5to	1039.76	-12.052		5to	1037.2	-8.105
		6to	1129.36	-6.217		6to	1125.2	-7.976		6to	1123.6	-8.75		6to	1121.68	-6.423
		7mo	1320.4	-2.898		7mo	1312.72	-2.404		7mo	1310.48	-3.693		7mo	1306.96	-3.105
	STT al inicio y 52	1er	926.16	-7.768	STT al inicio y 68	1er	923.92	-6.112	STT al inicio y 80	1er	923.6	-7.393	STT al inicio y 80*	1er	922	-4.04
		2do	940.56	-21.317		2do	938.64	-18.56		2do	938	-16.24		2do	936.72	-17.014
		3er	962	-23.148		3er	959.76	-14.675		3er	959.76	-14.824		3er	958.16	-15.778
		4to	993.36	-22.021		4to	991.12	-16.591		4to	990.48	-18.146		4to	988.24	-19.46
		5to	1043.28	-13.584		5to	1039.76	-12.232		5to	1040.08	-13.118		5to	1037.84	-8.669
		6to	1129.04	-7.635		6to	1126.16	-8.565		6to	1122.96	-9.207		6to	1121.36	-6.939
		7mo	1320.4	-3.041		7mo	1312.4	-2.382		7mo	1312.72	-3.743		7mo	1309.52	-3.34
	52 y TT al final	1er	927.12	-5.165	68 y TT al final	1er	924.24	-6.992	80 y TT al final	1er	923.6	-7.851	80 y TT al final	1er	921.68	-4.016
		2do	939.6	-14.332		2do	938.64	-25.832		2do	938	-17.151		2do	936.4	-14.903
		3er	961.04	-14.586		3er	959.76	-13.569		3er	959.12	-15.108		3er	957.52	-17.015
		4to	993.36	-16.002		4to	991.12	-14.358		4to	990.48	-16.262		4to	988.24	-18.566
		5to	1043.92	-8.59		5to	1039.44	-11.874		5to	1039.12	-12.561		5to	1037.52	-8.299
		6to	1129.36	-6.48		6to	1126.16	-8.343		6to	1123.28	-9.012		6to	1121.36	-6.319
		7mo	1320.4	-2.771		7mo	1312.4	-2.254		7mo	1308.24	-3.303		7mo	1310.48	-2.479
300 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 64*	1er	927.44	-5.995	TT al inicio y 64*	1er	926.8	-9.13	TT al inicio y 64*	1er	925.84	-6.017	TT al inicio y 64*	1er	923.92	-6.816
		2do	941.52	-16.402		2do	940.88	-19.485		2do	940.24	-17.139		2do	938	-24.312
		3er	962.64	-19.248		3er	962.64	-19.452		3er	961.68	-19.515		3er	959.12	-14.995
		4to	994.96	-23.141		4to	994	-21.455		4to	993.04	-19.766		4to	990.48	-20.033
		5to	1043.6	-9.872		5to	1043.28	-12.421		5to	1041.68	-9.728		5to	1039.76	-13.357
		6to	1131.92	-6.025		6to	1128.72	-7.25		6to	1125.84	-7.617		6to	1123.6	-8.912
		7mo	1327.44	-3.244		7mo	1314	-3.595		7mo	1316.88	-4.322		7mo	1314	-4.067
	TT al inicio y 68	1er	926.16	-6.833	TT al inicio y 68	1er	927.12	-9.951	TT al inicio y 68	1er	926.16	-6.547	TT al inicio y 68	1er	924.56	-7.325
		2do	940.56	-14.744		2do	940.56	-13.743		2do	940.56	-17.657		2do	938	-18.68
		3er	962.32	-19.457		3er	962.32	-12.081		3er	962	-17.94		3er	959.44	-12.115
		4to	994.32	-20.535		4to	993.68	-18.356		4to	993.04	-18.258		4to	989.84	-15.647
		5to	1043.6	-10.816		5to	1042.96	-12.272		5to	1041.36	-10.849		5to	1039.44	-14.857
		6to	1131.92	-6.945		6to	1129.04	-7.23		6to	1125.84	-8.389		6to	1123.92	-9.705
		7mo	1329.04	-3.388		7mo	1314	-3.728		7mo	1317.52	-4.375		7mo	1314.96	-4.228
		1er	925.52	-4.844	TT al inicio, 68	1er	927.76	-10.985	TT al inicio, 68	1er	925.52	-6.717		1er	923.92	-7.786
2do		942.48	-16.049	2do		940.88	-13.455	2do		939.6	-21.226	2do		937.68	-14.656	

	TT al inicio, 68 y TT al final	3er	962.64	-15.006	y TT al final	3er	961.04	-12.063	y TT al final	3er	961.36	-17.659	TT al inicio, 68 y TT al final	3er	958.8	-11.39	
		4to	994.96	-18.479		4to	993.04	-14.387		4to	993.04	-15.817		4to	989.84	-14.335	
		5to	1044.24	-8.09		5to	1041.68	-12.793		5to	1041.68	-11.718		5to	1039.44	-14.367	
		6to	1132.56	-5.958		6to	1129.68	-7.227		6to	1126.8	-7.952		6to	1123.92	-9.14	
		7mo	1332.56	-3.275		7mo	1310.8	-3.621		7mo	1319.44	-3.466		7mo	1317.84	-3.384	
400 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 48*	1er	1093.2	-6.042	STT al inicio y 56*	1er	1089.68	-5.569	STT al inicio y 72*	1er	1091.92	-5.899	STT al inicio y 84*	1er	1089.36	-7.841	
		2do	1134.48	-11.627		2do	1130.64	-12.274		2do	1133.84	-14.236		2do	1130.32	-16.383	
		3er	1198.8	-28.026		3er	1194.64	-21.431		3er	1197.52	-25.826		3er	1194.32	-22.552	
		4to	1311.44	-29.734		4to	1306.32	-32.508		4to	1310.16	-24.104		4to	1304.72	-24.974	
	STT al inicio y 52	1er	1093.52	-7.348	STT al inicio y 60	1er	1090	-6.285	STT al inicio y 76	1er	1092.24	-6.295	STT al inicio y 88	1er	1089.36	-8.494	
		2do	1135.44	-15.599		2do	1131.28	-14.737		2do	1133.84	-15.567		2do	1130.64	-17.72	
		3er	1199.44	-16.111		3er	1194.96	-19.262		3er	1197.52	-20.187		3er	1194	-24.388	
		4to	1312.4	-19.369		4to	1306.64	-20.764		4to	1310.48	-29.472		4to	1305.04	-23.317	
	52 y TT al final	1er	1090.96	-2.976	60 y TT al final	1er	1089.68	-6.034	76 y TT al final	1er	1091.92	-6.532	88 y TT al final	1er	1088.4	-9.022	
		2do	1136.08	-6.122		2do	1130.96	-15.657		2do	1133.52	-16.105		2do	1130	-20.44	
		3er	1197.52	-10.093		3er	1194.96	-19.263		3er	1197.84	-19.423		3er	1194.32	-18.649	
		4to	1309.52	-23.358		4to	1306.64	-20.549		4to	1310.48	-34.509		4to	1305.36	-24.692	
400 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 56*	1er	1092.88	-7.391	TT al inicio y 52*	1er	1091.28	-4.919	TT al inicio y 64*	1er	1095.12	-7.03	TT al inicio y 68*	1er	1090.64	-7.048	
		2do	1135.12	-13.966		2do	1133.84	-9.032		2do	1137.04	-13.127		2do	1133.52	-16.625	
		3er	1199.12	-26.193		3er	1197.84	-21.129		3er	1202.64	-17.626		3er	1196.88	-24.157	
		4to	1312.72	-29.095		4to	1310.48	-22.469		4to	1312.08	-27.234		4to	1308.56	-25.405	
	TT al inicio y 60	1er	1092.56	-8.262	TT al inicio y 56	1er	1090.96	-5.496	TT al inicio y 68	1er	1095.44	-7.428	TT al inicio y 72	1er	1090.64	-7.956	
		2do	1134.8	-17.518		2do	1134.16	-10.323		2do	1136.72	-15.357		2do	1133.2	-20.832	
		3er	1199.12	-19.717		3er	1197.84	-22.838		3er	1201.36	-20.463		3er	1197.2	-28.503	
		4to	1312.08	-18.296		4to	1309.84	-24.81		4to	1312.72	-28.463		4to	1308.56	-38.047	
	TT al inicio, 60 y TT al final	1er	1090.32	-3.319	TT al inicio, 56 y TT al final	1er	1090.96	-5.474	TT al inicio, 68 y TT al final	1er	1093.2	-6.065	TT al inicio, 72 y TT al final	1er	1090.32	-8.563	
		2do	1132.88	-3.859		2do	1133.52	-10.351		2do	1134.8	-11.575		2do	1132.88	-20.429	
		3er	1197.2	-6.779		3er	1197.2	-25.211		3er	1199.12	-32.781		3er	1196.88	-19.231	
		4to	1306.96	-21.486		4to	1309.52	-20.206		4to	1312.72	-21.871		4to	1309.84	-20.975	
500 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 36*	1er	1212.56	-3.912	STT al inicio y 64*	1er	1209.36	-4.253	STT al inicio y 56*	1er	1211.28	-5.883	STT al inicio y 88*	1er	1212.24	-6.891	
		2do	1276.24	-15.627		2do	1274.96	-19.79		2do	1268.24	-8.19		2do	1269.52	-10.726	
		3er	1393.36	-25.576		3er	1394	-21.616		3er	1385.36	-25.469		3er	1385.68	-21.2	
	STT al inicio y 40	1er	1212.56	-4.283	STT al inicio y 68	1er	1209.04	-4.846	STT al inicio y 60	1er	1212.24	-6.423	STT al inicio y 92	1er	1212.56	-7.181	
		2do	1275.28	-26.178		2do	1275.6	-22.235		2do	1268.24	-9.42		2do	1269.84	-12.425	
		3er	1393.36	-14.63		3er	1395.6	-35.523		3er	1385.36	-24.188		3er	1385.68	-20.021	
	40 y TT al final	1er	1213.2	-3.072	68 y TT al final	1er	1209.36	-4.768	60 y TT al final	1er	1211.92	-5.11	92 y TT al final	1er	1212.56	-6.617	
		2do	1277.2	-11.422		2do	1275.28	-25.589		2do	1268.56	-9.881		2do	1269.52	-13.739	
		3er	1390.8	-24.184		3er	1395.92	-20.555		3er	1385.36	-26.083		3er	1385.68	-19.635	
	500 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 32*	1er	1211.6	-3.854	TT al inicio y 84*	1er	1216.08	-4.291	TT al inicio y 56*	1er	1215.44	-5.344	TT al inicio y 60*	1er	1209.68	-7.23
			2do	1274	-11.246		2do	1272.4	-8.68		2do	1270.8	-9.024		2do	1269.52	-12.144
			3er	1390.48	-32.966		3er	1390.48	-20.852		3er	1389.52	-22.889		3er	1385.36	-21.755
TT al inicio y 36		1er	1212.88	-4.474	TT al inicio y 88	1er	1216.72	-4.667	TT al inicio y 60	1er	1216.08	-5.86	TT al inicio y 64	1er	1210.32	-8.114	
		2do	1274	-16.731		2do	1272.4	-10.011		2do	1271.44	-10.815		2do	1268.88	-12.982	
		3er	1390.8	-16.96		3er	1390.8	-17.931		3er	1390.16	-22.677		3er	1386.32	-23.486	
			1er	1211.28	-2.741	TT al inicio, 88	1er	1216.72	-4.488	TT al inicio, 60	1er	1215.44	-4.914		1er	1210.32	-8.389
			2do	1274	-7.195		2do	1272.72	-9.8		2do	1272.08	-12.202		2do	1269.2	-15.655

	TT al inicio, 36 y TT al final	3er	1386	-12.173	y TT al final	3er	1390.8	-20.92	y TT al final	3er	1389.84	-19.983	TT al inicio, 64 y TT al final	3er	1386.32	-19.896
600 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 32*	1er	938	-4.544	STT al inicio y 64*	1er	937.36	-12.361	STT al inicio y 72*	1er	938.64	-10.133	STT al inicio y 64*	1er	935.44	-11.323
		2do	951.12	-7.41		2do	949.52	-7.306		2do	951.12	-8.596		2do	948.24	-12.446
		3er	972.24	-4.753		3er	970	-12.118		3er	972.24	-13.382		3er	968.4	-15.271
		4to	1004.24	-4.385		4to	1001.36	-13.646		4to	1002.96	-16.592		4to	999.44	-18.298
		5to	1058.64	-1.426		5to	1057.36	-7.216		5to	1058.64	-8.43		5to	1053.2	-7.583
		6to	1131.92	-1.742		6to	1127.12	-7.147		6to	1132.24	-7.287		6to	1122.96	-7.841
		7mo	1311.76	-7.038		7mo	1306	-4.732		7mo	1310.16	-9.714		7mo	1300.88	-6.347
		8vo	1403.28	-21.317		8vo	1395.6	-5.416		8vo	1403.92	-24.256		8vo	1386.32	-5.272
		9no	1607.44	-16.228		9no	1599.76	-14.137		9no	1614.16	-18.45		9no	1590.16	-12.359
	STT al inicio y 36	1er	938	-5.985	STT al inicio y 68	1er	937.36	-13.364	STT al inicio y 76	1er	938.64	-7.554	STT al inicio y 68	1er	935.44	-12.139
		2do	951.44	-10.018		2do	949.84	-5.927		2do	950.8	-7.886		2do	948.24	-10.18
		3er	971.92	-6.561		3er	970	-12.193		3er	971.6	-11.836		3er	968.4	-15.467
		4to	1003.6	-5.783		4to	1001.68	-14.062		4to	1003.28	-13.994		4to	999.44	-15.129
		5to	1059.6	-1.736		5to	1057.36	-8.337		5to	1059.28	-9.727		5to	1053.52	-8.439
		6to	1131.92	-2.264		6to	1126.8	-8.293		6to	1131.6	-8.483		6to	1122.64	-8.951
		7mo	1312.08	-8.914		7mo	1306	-4.944		7mo	1309.2	-10.253		7mo	1300.88	-6.347
		8vo	1403.28	-31.958		8vo	1394.96	-5.779		8vo	1403.28	-31.681		8vo	1386.32	-6.13
		9no	1608.08	-13.988		9no	1600.4	-12.846		9no	1618.64	-16.141		9no	1589.2	-12.554
	36 y TT al final	1er	946.64	-4.946	68 y TT al final	1er	937.36	-12.141	76 y TT al final	1er	938.64	-7.239	68 y TT al final	1er	935.12	-11.893
		2do	966.48	-2.922		2do	949.84	-5.994		2do	951.44	-7.116		2do	947.92	-9.323
		3er	975.12	-2.874		3er	970	-13.772		3er	971.6	-10.928		3er	968.08	-14.443
		4to	1006.16	-3.865		4to	1001.68	-11.692		4to	1003.28	-13.111		4to	999.44	-15.142
		5to	1061.2	-1.401		5to	1057.68	-8.368		5to	1059.28	-9.705		5to	1054.48	-7.26
		6to	1134.48	-1.956		6to	1126.8	-7.73		6to	1131.28	-9.143		6to	1123.6	-8.379
		7mo	1318.16	-5.418		7mo	1306.32	-4.912		7mo	1309.52	-10.386		7mo	1301.52	-5.961
		8vo	1407.12	-15.339		8vo	1395.6	-6.148		8vo	1402.96	-23.71		8vo	1387.6	-5.545
		9no	1607.44	-26.641		9no	1601.04	-20.249		9no	1618.32	-17.157		9no	1591.76	-13.208
600 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 32*	1er	938.32	-4.58	TT al inicio y 64*	1er	938.96	-11.358	TT al inicio y 48*	1er	938.64	-11.23	TT al inicio y 64*	1er	934.8	-12.595
		2do	950.8	-7.184		2do	950.8	-7.016		2do	951.12	-13.751		2do	947.92	-9.015
		3er	971.92	-5.136		3er	971.6	-13.851		3er	972.24	-10.552		3er	967.76	-13.433
		4to	1003.92	-4.499		4to	1002.96	-12.281		4to	1003.92	-9.271		4to	998.8	-14.61
		5to	1058.32	-1.6		5to	1059.6	-7.029		5to	1061.52	-4.632		5to	1053.2	-7.254
		6to	1131.92	-1.956		6to	1129.36	-7.415		6to	1133.2	-5.571		6to	1122.96	-7.407
		7mo	1313.04	-8.5		7mo	1308.56	-5.633		7mo	1311.76	-9.527		7mo	1300.88	-7.232
		8vo	1403.6	-21.657		8vo	1400.4	-10.364		8vo	1404.24	-22.766		8vo	1386.96	-5.484
		9no	1603.6	-30.07		9no	1605.2	-22.993		9no	1608.72	-14.369		9no	1593.04	-9.511
	TT al inicio y 36	1er	938.32	-6.443	TT al inicio y 68	1er	938.64	-13.678	TT al inicio y 52	1er	938.96	-12.931	TT al inicio y 68	1er	934.8	-12.428
		2do	951.12	-9.878		2do	950.48	-5.917		2do	951.12	-15.55		2do	947.6	-7.302
		3er	972.56	-6.8		3er	971.28	-12.066		3er	971.92	-11.425		3er	968.08	-13.626
		4to	1003.6	-6.118		4to	1003.28	-10.9		4to	1003.92	-11.046		4to	999.12	-12.308
		5to	1060.56	-1.955		5to	1059.6	-7.669		5to	1060.88	-4.906		5to	1053.52	-7.911
		6to	1131.28	-2.53		6to	1129.04	-8.632		6to	1132.24	-6.058		6to	1122.96	-8.348
		7mo	1313.04	-11.102		7mo	1307.92	-5.884		7mo	1311.76	-10.815		7mo	1300.88	-7.474

	TT al inicio, 36 y TT al final	8vo	1401.68	-16.684	TT al inicio, 68 y TT al final	8vo	1400.4	-11.216	TT al inicio, 52 y TT al final	8vo	1403.28	-23.577	TT al inicio, 68 y TT al final	8vo	1386.96	-6.278
		9no	1604.24	-10.417		9no	1603.6	-31.023		9no	1605.84	-26.179		9no	1591.44	-11.433
		1er	939.28	-4.552		1er	938.64	-11.014		1er	938.64	-13.766		1er	934.8	-13.187
		2do	950.8	-7.098		2do	950.48	-5.637		2do	950.8	-15.013		2do	947.28	-6.934
		3er	971.92	-4.447		3er	971.28	-11.21		3er	972.24	-12.867		3er	967.76	-12.973
		4to	1002.64	-3.831		4to	1002.96	-10.222		4to	1003.6	-11.559		4to	998.8	-12.068
		5to	1061.84	-1.503		5to	1059.6	-7.542		5to	1061.52	-5.151		5to	1053.52	-7.852
		6to	1133.84	-2.058		6to	1129.04	-8.124		6to	1131.92	-6.465		6to	1123.28	-8.434
		7mo	1309.2	-7.065		7mo	1308.56	-5.592		7mo	1312.08	-10.685		7mo	1300.88	-7.381
8vo	1399.12	-20.786	8vo	1402	-11.267	8vo	1403.28	-34.091	8vo	1386.96	-6.66					
9no	1599.12	-17.532	9no	1607.76	-15.333	9no	1610.64	-16.663	9no	1594.32	-12.008					
700 (STT al inicio y CTT al final)	STT al inicio y 36*	1er	1036.56	-4.302	STT al inicio y 60*	1er	1036.24	-9.979	STT al inicio y 52*	1er	1031.44	-6.376	STT al inicio y 60*	1er	1029.52	-5.985
		2do	1067.6	-5.895		2do	1067.28	-14.689		2do	1062.48	-9.254		2do	1060.24	-10.406
		3er	1118.16	-9.636		3er	1117.84	-22.694		3er	1112.08	-16.461		3er	1109.52	-13.368
		4to	1186.96	-9.54		4to	1186.32	-19.464		4to	1179.6	-20.253		4to	1177.04	-20.832
		5to	1322	-5.406		5to	1319.12	-13.873		5to	1307.92	-9.607		5to	1304.72	-10.839
		6to	1409.04	-22.648		6to	1408.4	-9.138		6to	1399.12	-22.485		6to	1396.88	-5.419
		7mo	1531.92	-19.235		7mo	1529.04	-5.351		7mo	1520.4	-15.203		7mo	1532.24	-10.313
	STT al inicio y 40	1er	1036.24	-5.48	STT al inicio y 64	1er	1036.24	-11.076	STT al inicio y 56	1er	1031.76	-7.485	STT al inicio y 64	1er	1029.52	-6.606
		2do	1067.28	-7.202		2do	1067.28	-15.239		2do	1062.48	-11.209		2do	1060.24	-11.89
		3er	1118.16	-13.207		3er	1117.52	-16.409		3er	1112.08	-18.469		3er	1109.52	-15.468
		4to	1186.96	-13.239		4to	1186	-19.81		4to	1179.6	-18.231		4to	1177.36	-20.18
		5to	1322.32	-6.763		5to	1319.44	-19.952		5to	1308.24	-11.777		5to	1304.72	-12.77
		6to	1409.04	-18.436		6to	1408.08	-11.7		6to	1399.44	-15.947		6to	1397.52	-6.071
		7mo	1531.6	-29.208		7mo	1529.36	-5.982		7mo	1520.72	-17.12		7mo	1532.56	-12.667
	40 y TT al final	1er	1034	-2.118	64 y TT al final	1er	1035.92	-11.842	56 y TT al final	1er	1031.76	-7.554	64 y TT al final	1er	1029.2	-6.586
		2do	1066.64	-3.751		2do	1066.96	-14.655		2do	1062.48	-11.078		2do	1060.24	-11.825
		3er	1118.48	-5.697		3er	1117.84	-14.404		3er	1112.4	-18.129		3er	1109.52	-17.778
		4to	1187.6	-6.927		4to	1186	-18.132		4to	1180.24	-18.73		4to	1177.36	-18.728
		5to	1321.68	-6.028		5to	1320.08	-19.857		5to	1309.84	-11.934		5to	1306	-13.156
		6to	1410.64	-8.743		6to	1408.4	-11.589		6to	1400.4	-16.086		6to	1397.2	-6.007
		7mo	1523.28	-10.542		7mo	1530.32	-6.259		7mo	1520.08	-18.034		7mo	1534.16	-11.392
700 (CTT al inicio y al final)	TT al inicio y 36*	1er	1036.88	-4.633	TT al inicio y 52*	1er	1034.32	-6.467	TT al inicio y 48*	1er	1033.68	-5.834	TT al inicio y 64*	1er	1030.16	-7.485
		2do	1067.28	-5.805		2do	1065.36	-11.399		2do	1065.04	-7.715		2do	1060.56	-12.531
		3er	1117.52	-8.029		3er	1115.6	-19.139		3er	1114.96	-10.472		3er	1109.84	-18.259
		4to	1186.32	-7.009		4to	1183.76	-20.09		4to	1182.8	-12.457		4to	1177.68	-22.312
		5to	1322	-4.402		5to	1315.92	-10.417		5to	1314	-6.857		5to	1305.68	-13.66
		6to	1410	-25.427		6to	1404.56	-7.049		6to	1404.24	-24.733		6to	1397.52	-10.96
		7mo	1531.6	-30.085		7mo	1525.2	-4.476		7mo	1525.2	-16.326		7mo	1534.16	-11.387
	TT al inicio y 40	1er	1036.88	-5.876	TT al inicio y 56	1er	1034.32	-7.584	TT al inicio y 52	1er	1033.68	-6.563	TT al inicio y 68	1er	1030.16	-8.347
		2do	1067.28	-7.042		2do	1065.68	-13.166		2do	1065.04	-8.552		2do	1060.88	-14.384
		3er	1117.84	-10.778		3er	1115.92	-18.562		3er	1115.28	-12.135		3er	1110.16	-18.75
		4to	1186.64	-9.324		4to	1183.44	-18.012		4to	1183.12	-14.563		4to	1178	-16.051
		5to	1321.68	-5.556		5to	1316.88	-12.914		5to	1314	-7.521		5to	1305.68	-16.865
		6to	1409.04	-22.403		6to	1404.88	-8.034		6to	1403.92	-23.957		6to	1397.2	-12.971
		7mo	1532.88	-29.285		7mo	1524.88	-5.269		7mo	1525.84	-20.276		7mo	1534.16	-13.814

TT al inicio, 40 y TT al final	1er	1034.64	-2.566	TT al inicio, 56 y TT al final	1er	1034.32	-7.486	TT al inicio, 52 y TT al final	1er	1033.68	-6.541	TT al inicio, 68 y TT al final	1er	1029.84	-8.591
	2do	1066.32	-4.247		2do	1065.36	-14.533		2do	1064.72	-9.057		2do	1060.56	-15.438
	3er	1117.52	-5.358		3er	1115.6	-20.262		3er	1115.28	-13.324		3er	1110.16	-16.952
	4to	1187.92	-6.666		4to	1183.44	-21.2		4to	1183.12	-14.391		4to	1178	-15.604
	5to	1321.36	-4.695		5to	1316.88	-13.172		5to	1314.96	-7.619		5to	1307.28	-19.722
	6to	1409.36	-16.428		6to	1404.88	-7.968		6to	1404.24	-22.364		6to	1397.84	-13.69
	7mo	1528.72	-26.401		7mo	1526.16	-5.267		7mo	1525.2	-27.143		7mo	1535.44	-13.457

*El pico con mayor profundidad

Tabla 3. Valores obtenidos de las RPL fabricadas en fibra 1060-XP.