

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Estudio experimental de fibras estrechadas para su uso como sensores de fibra óptica



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Alumna: María Planillo Carrera

Directores: Rosa Ana Pérez Herrera

Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 27 de Junio de 2017





Resumen

La finalidad de este estudio, que se ha realizado como trabajo final de grado, ha sido analizar el comportamiento que tiene la luz al ser guiada a lo largo de una estructura de fibras estrechadas y poder llegar así a una configuración óptima para ser usadas como sensores.

Tras realizar un estudio, tanto teórico como experimental, se ha llegado a la conclusión de la importancia que tiene el ángulo de inclinación del taper para el acoplo de modos a lo largo de su cintura. Se han realizado diferentes tapers con diferentes ángulos de inclinación y se ha observado la respuesta que estos tenían con la ayuda del reflectómetro LUNA OBR 4600. Una vez caracterizados los tapers se han elegido los que presentaban mejor respuesta frecuencial y se han realizados diferentes medidas con variaciones de temperatura, humedad y vibración.

Abstract

The purpose of this study, which has been carried out as final grade work, has been to analyze the behavior of light to be guided along a structure of narrowed fibers and find optimal configuration to be used as sensors.

After carrying out a study, both theoretical and experimental, it has come to the conclusion of the importance of the angle of inclination of the taper for the coupling of modes along its waist. Different tapers with different angles of inclination have been made and the response that they had with the aid of the LUNA OBR 4600 reflectometer has been observed. Once the tapers have been characterized, the ones with the best frequency response have been chosen and different measurements have been made with variations Temperature, humidity and vibration.



Lista de palabras clave

- Fibra estrechada o Taper
- Ahusamiento
- Pendiente
- Transición
- Cintura
- Angulo de inclinación
- Taper adiabático
- Acoplamiento de modos
- Polarización
- Sensibilidad de un sensor de fibra óptica
- Sensores de fibra óptica
- Reflectómetro
- Interrogador de sensores
- Circulador óptico
- Beam Splitter



Índice

Resumen	2
Abstract	2
Lista de palabras clave	3
1. Introducción.....	6
2. Conceptos teóricos.....	7
2.1 Fibra monomodo estándar de salto de índice	7
2.2 Propagación de la luz en fibras ópticas estrechadas.....	9
2.2.1 Constantes de propagación en fibras estrechadas	9
2.2.2 Acoplamiento a modos de orden superior	10
2.3 Ángulo de inclinación del taper.....	11
2.4 Tipos de fibras estrechadas.....	14
2.4.1 Short tapers.....	14
2.4.2 Long Taper.....	18
2.4.2.1 Características y métodos de fabricación	18
2.4.2.2 Adiabatic Long Taper.....	19
2.4.2.3 Non-Adiabatic Long Taper.....	20
3. Taper Manufacturing Station	22
3.1 Single Direction Table.....	23
3.2 Bi-direccional Table	24
4. Estudio experimental	26
4.1 Variación de las pendientes en las transiciones del taper para comprobar el efecto sobre su respuesta.	26
4.1.1 Uso del LUNA.....	27
4.1.2 Uso del beam splitter	27
4.1.3 Taper Número1	28
4.1.3.1 Pendiente1	29
4.1.3.2 Pendiente 2	32
4.1.4 Taper Numero2	34
4.1.4.1 Pendiente 1	35
4.1.5 Taper Numero3	38
4.1.5.1 Pendiente 1	39
4.1.5.2 Pendiente 2	42
4.1.6 Taper Numero4	44



4.1.6.1	Pendiente 1	44
4.1.6.2	Pendiente 2	47
4.1.7	Comparación de los resultados obtenidos.....	49
4.2	Estudio experimental del uso de tapers como sensores de diferentes parámetros.	51
4.2.1	Taper Numero 1	52
4.2.1.1	Pendiente 1	52
4.2.1.1.1	Medidas de Temperatura.....	53
4.2.1.2	Pendiente 2	57
4.2.1.2.1	Medidas de Temperatura.....	59
4.2.1.3	Otras medidas realizadas	61
4.2.1.3.1	Medidas con humedad (vaho)	61
4.2.1.3.2	Medidas con vibraciones.....	63
4.2.2	Taper Numero 2	64
4.2.2.1	Pendiente 1	64
4.2.2.1.1	Medidas con temperatura	66
4.2.2.1.2	Medidas con humedad (vaho)	68
4.2.2.1.3	Medidas con vibraciones.....	70
4.3	Conclusiones.....	72
5.	Bibliografía	74



1. Introducción

En la física moderna y la ingeniería, las fibras ópticas tienen numerosas aplicaciones. Principalmente su propiedad para guiar y transmitir luz con muy baja pérdida a grandes distancias las ha hecho verdaderamente útiles y que sean excepcionalmente buenas en el transporte de información, algo actualmente deseado [5].

Después de descubrir que las fibras ópticas con diámetros muy pequeños todavía guían la luz con menores pérdidas, se han descubierto nuevas posibilidades de aplicación. Estas fibras nano han resultado ser muy útiles como divisores de haz, como sensores de molécula única, y en óptica integrada como acopladores. La propiedad explotada para estos casos es su capacidad para que la luz se propague en el exterior de la fibra. Cuando la luz es guiada a través de la sección nano, el modo se extiende a lo largo de la fibra estrechada, y la luz será guiada como un campo evanescente [5].

Actualmente, hay un creciente interés en el desarrollo de estructuras de sensores basadas en fibra óptica. Entre estas estructuras, las secciones adelgazadas (“tapers”) de fibras ópticas monomodo son dispositivos simples y muy sensibles a los cambios del índice de refracción del medio circundante y a la longitud de onda de la luz que se propaga por ellas [8,9]. Debido al campo evanescente mencionado anteriormente la sección estrechada es muy sensible a las perturbaciones ambientales, por lo que dependiendo su utilidad se deberá tener en cuenta la longitud de la misma. La forma de esta sección ahusada es muy importante, ya que determina la transmitancia a través de la fibra [12,75].

En estas estructuras se puede observar una primera región de fibra sin modificaciones antes del taper; una segunda región de transición en la que el diámetro de la fibra disminuye; la tercera región constituye la cintura del taper; la cuarta región es una nueva transición en la que el diámetro de la fibra aumenta; la quinta, y última región, es nuevamente la fibra sin modificaciones después del taper. En el caso de tapers de fibra óptica monomodo, solamente se excita el modo de propagación fundamental en la primera región que, como en cualquier modo de propagación, se pueden distinguir dos componentes del campo electromagnético, la que está dentro del núcleo y la componente evanescente que se propaga por la región del revestimiento de la fibra, que por ser mucho más gruesa que el núcleo, hace que la interacción con el medio externo sea insignificante. Entonces, la potencia óptica transmitida por la fibra se acopla a los modos del revestimiento de la cintura del taper a través de la región de transición. Como la cintura es la parte más delgada del taper, el núcleo de la fibra prácticamente colapsa, de tal manera que se admite como un cilindro dieléctrico multimodo, por el que se pueden excitar modos de orden superior cuyas componentes evanescentes interactúan con el medio externo, de tal manera que la luz que alcance la segunda transición es re-acoplada en la última sección del taper, presentando pérdidas de potencia óptica atribuidas a la interacción con el medio. Algunos sensores usan la posibilidad de curvar la región adelgazada del taper para excitar otros modos [10,11,12].

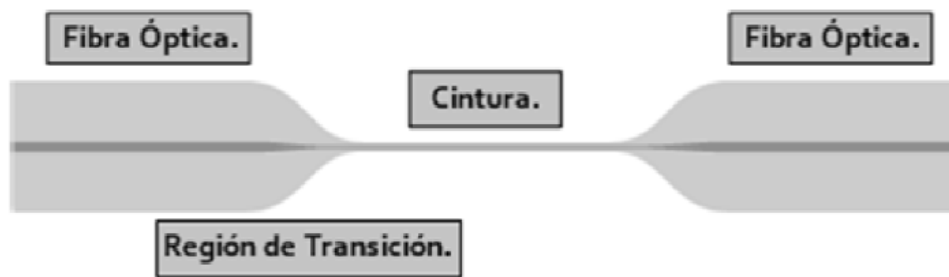


Figura 1-1: Estructura de una fibra óptica estrechada ("taper") [12].

2. Conceptos teóricos

En esta sección se va a describir el funcionamiento de las fibras de salto de índice, y mostrar un esquema de la teoría más importante que hay tras los modos guiados. Esta permite predecir cuando ocurren las excitaciones de mayor orden a medida que el diámetro de la fibra disminuye. Para obtener una mayor sensibilidad de las fibras deberán llevarse a cabo las excitaciones de mayor orden, manteniendo la forma deseada en las fibras [5,66].

2.1 Fibra monomodo estándar de salto de índice

Una fibra óptica está compuesta por sílice de alta calidad (vidrio) con un diámetro aproximadamente de 0.1mm. A diferencia de una fibra óptica de índice gradual, cuyo índice de refracción cambia gradualmente desde el centro hacia afuera, una de salto de índice se compone de dos capas; El núcleo y el revestimiento, con índices de refracción ligeramente diferentes, como se observa en la figura 2.1-1. El índice de refracción del núcleo es ligeramente mayor que el de del revestimiento, $n_{co} > n_{cl}$, y en la óptica de rayos esto implica una reflexión interna total de Luz sobre la interfaz entre el núcleo y el revestimiento. Esto significa que la luz puede propagarse por el núcleo de la fibra, si el ángulo incidente Θ_i es tal que el ángulo de la reflexión interna Θ es menor que el ángulo crítico Θ_c [5,7].

El ángulo crítico es el ángulo máximo para el cual tiene lugar la reflexión interna total, y se da como $\Theta_c = \sin^{-1}(n_{cl}/n_{co})$ [13]. El tamaño relativo de los índices de refracción para el núcleo y el revestimiento es por tanto crucial para la facilidad con que la luz puede acoplarse a la fibra. Para una fibra monomodo, el ángulo crítico de la luz incidente es tan pequeño que solamente se conduce la luz casi paralela al eje de la fibra. Por lo tanto, las fibras monomodo se denominan de guiado débil. [5]

Los modos guiados por el núcleo de la fibra de radio ρ_{co} están gobernados por el parámetro de guiado por el núcleo, también llamado el parámetro V:



$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{co} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \tag{1}$$

Dónde λ es la longitud de onda de la luz acoplada. El parámetro V sólo tiene en cuenta los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, lo que significa que descuida el aire circundante y asume una región de recubrimiento infinita. El modo de fibra guiado en una fibra monomodo se propaga por el núcleo, por lo tanto, también se denomina el modo del núcleo. Existen también modos de revestimiento de orden superior, que son los posibles modos que podrían ser guiados por el revestimiento. Cuando se acopla luz en una fibra, hay que asegurarse de no acoplarla en un modo de revestimiento en lugar de en un modo de núcleo. Para las fibras monomodo, el radio del núcleo se elige de modo que $V < 2,405$, donde los modos de orden superior ya no se guían en el núcleo, sino en el revestimiento, y sólo el modo fundamental se deja en el núcleo. Esto se denomina corte de modo único [5,77,76].

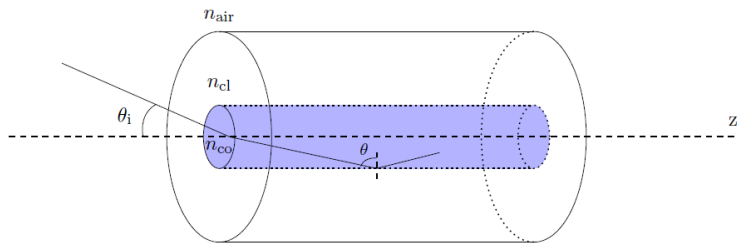


Figura 2.1-1: Fibra óptica de salto de índice [5].

En la figura 2.1-1 se puede observar una fibra óptica de salto de índice. El núcleo (azul), tiene un índice de refracción ligeramente mayor que el revestimiento: $n_{co} > n_{cl}$. n_{air} es el índice de refracción del aire y es ~ 1 . Para que la luz sea guiada, debe incidir con un ángulo tal que $\theta < \theta_{ec}$ [5,77,76].

Un modo de una fibra se define como una distribución de campo que, aparte de una fase, conserva su forma mientras se propaga a lo largo del eje z de la fibra. La fase está dada por la última exponencial en el campo eléctrico del modo, que en coordenadas cilíndricas se escribe como:

$$E(r, \phi, z) \propto (r, \phi) \exp(-i\varepsilon\beta z) \tag{2}$$

donde E es la amplitud del campo, y β es la constante de propagación. Suponiendo una fibra simétrica infinitamente larga y perfectamente cilíndrica, se encuentra resolviendo la ecuación de la onda escalar [13]:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} + \frac{n^2}{\lambda^2} \varepsilon = 0, \tag{3}$$

Donde n es el índice de refracción en la capa relevante. La hipótesis del revestimiento infinito también se justifica aquí. Para los modos guiados por el núcleo la cantidad de campo en



la región del revestimiento es pequeña, y por lo tanto esta es una buena aproximación. Después de resolver la ecuación 3 por separado para las dos regiones con distinto índice, las soluciones completas se construyen requiriendo que la distribución de intensidad radial sea continua en los bordes, finita en el centro y cero en el infinito. Resolviendo la ecuación del valor propio de las soluciones, se obtiene la constante de propagación β deseada. Al asumir una región de revestimiento infinita, el modo fundamental se guía siempre en el núcleo. Como veremos, esta aproximación de revestimiento infinita falla en radios de núcleos muy pequeños, donde el volumen de modo comienza a aumentar, y se extiende fuera del núcleo de la fibra. Si se tiene en cuenta el revestimiento finito, en algún momento el modo fundamental comenzará efectivamente a guiarse en el revestimiento en lugar del núcleo. [5,7].

2.2 Propagación de la luz en fibras ópticas estrechadas

Mientras la aproximación de guiado débil se mantenga, los modos que se propagan en la fibra pueden ser aproximados por los modos LP_{lm} . Estos modos son linealmente polarizados, lo que significa que la polarización a lo largo del eje de la fibra es descuidada. El perfil de intensidad para los primeros cuatro modos LP_{lm} se representa en la figura 3, donde el modo fundamental es el LP_{01} [5].

El acoplamiento entre dos modos puede llegar a ser efectivo cuando los dos modos tienen una simetría espacial azimutal similar, es decir, tienen el mismo valor l . Considerando la figura 3, el modo fundamental sería, por lo tanto, probablemente el que se acople al modo LP_{02} . El acoplamiento a modos con simetría diferente requeriría romper la simetría azimutal de la fibra. Esto podría ocurrir mediante un fuerte doblado de la fibra o, por ejemplo, por partículas de polvo que causan dispersión [5,73].

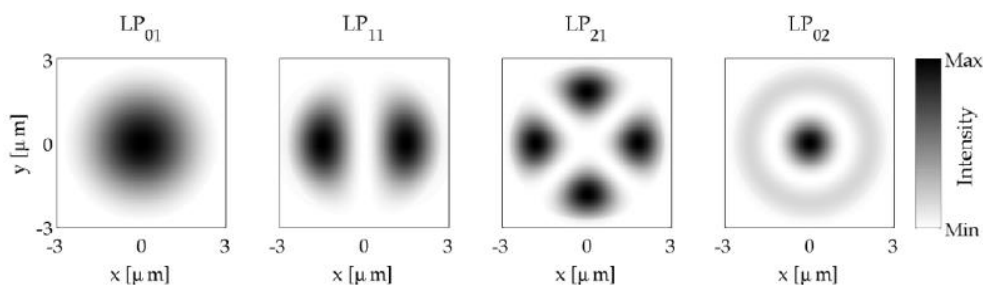


Figura 2.2-1: El perfil de intensidad transversal para los primeros cuatro modos LP_{lm} [14].

2.2.1 Constantes de propagación en fibras estrechadas

A continuación, se presenta un esquema cualitativo de los aspectos físicos más importantes de la derivación de la constante de propagación del modo y de los índices de refracción efectivos para un taper. Para una derivación más completa se debe consultar [15].

El campo eléctrico de un modo que se propaga en una fibra estrechada es de la forma:



$$E(r, \phi, z) \propto (r, \phi) e^{-i \int_0^z \beta(z') dz'}, \quad (4)$$

donde la integral de β es la fase acumulada que experimenta el campo durante la propagación. Oponiéndose al caso con la fibra sin estrechar, cambiará ahora a lo largo del eje de la fibra. Antes de la sección ahusada, el modo fundamental se propagará en el núcleo como se describe en la sección 2.1. Al entrar en la región cónica, donde el radio del núcleo se hace más pequeño, el modo fundamental se propagará cada vez más en el revestimiento, afectando el índice de refracción efectivo que el campo "siente". Esta es otra forma de entender la dependencia de z , ya que el índice de refracción efectivo se relaciona linealmente como:

$$\beta = k_0 n_{eff} \quad (5)$$

donde $k_0 = 2\pi/\lambda$ es el k-vector en el espacio libre. Los modos guiados en la fibra estrechada se encuentran, como en el caso de la fibra sin estrechar, resolviendo la ecuación de onda escalar en coordenadas cilíndricas. Se resuelve con las condiciones de contorno apropiadas para cada punto a lo largo del eje z como si estuvieran en cilindros infinitamente largos. (observar las líneas azules de la figura 2.3-1) [5].

Cuando se resuelve la ecuación de onda para la fibra estrechada, la aproximación del revestimiento infinito ya no es válida, y debe hacerse en las tres regiones de diferentes índices de refracción. Las soluciones deben conectarse continuamente en los bordes al igual que para la fibra sin estrechar. Estas soluciones continuas conducen a los modos LP aproximados. Las constantes de propagación para los modos se pueden encontrar resolviendo la ecuación del autovalor [5].

2.2.2 Acoplamiento a modos de orden superior

Los índices de refracción efectivos para cada modo pueden expresarse como una función del parámetro V de la guía del núcleo. Esto puede hacerse, ya que la relación entre el núcleo y los radios de revestimiento es constante, por lo tanto, el parámetro V es sólo proporcional al radio del núcleo. Los índices de refracción efectivos para los dos primeros modos LP_{0m} en nuestra fibra se representan en función del parámetro V de la figura 2.3-2. A valores grandes del parámetro V vemos que ambos modos se guían en el núcleo. A partir de $V = 2,405$ y hacia abajo, el modo LP_{02} se guía en el revestimiento, y éste es el corte de un único modo de propagación antes mencionado. El valor del parámetro V para nuestra fibra sin estrechar es $V = 2,34$ y se indica justo debajo del punto de corte [5,14].

A medida que el radio del núcleo disminuye, el índice de refracción óptico del modo fundamental se aproxima al índice de refracción del revestimiento. En contraste con la solución de revestimiento infinito, el valor del índice de refracción efectivo se mueve ahora por debajo del valor de revestimiento. En algún momento $n_{eff01} = n_{cl}$. Esto sucede en $V = V_{cc}$ en aproximadamente 0,75, que se llama el corte del modo de núcleo para el modo fundamental. Cerca de V_{cc} , el índice de refracción efectivo del modo LP_{02} está muy cerca del modo

fundamental, y es cuando el núcleo se estrecha hasta este punto que la luz puede acoplarse al modo LP₀₂ [5].

2.3 Ángulo de inclinación del taper

La forma de la sección estrechada puede describirse mediante el ángulo $\Omega(z)$ en cada punto a lo largo del eje.

$\Omega(z)$ se define como:

$$\Omega(z) = \left| \frac{\partial \rho_{co}(z)}{\partial z} \right|, \tag{6}$$

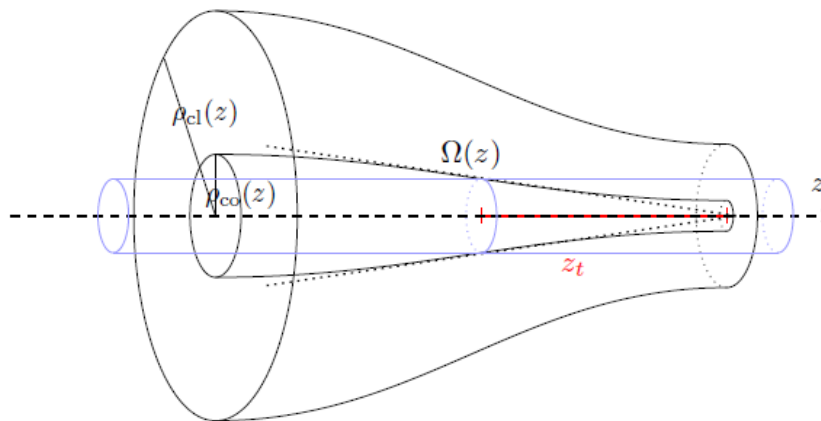


Figura 2.3-1: Imagen de un taper cortado a la mitad [5].

En la figura 2.3-1 se muestra un lado de una fibra estrechada, donde $\Omega(z)$ es el ángulo de inclinación local del taper.



La longitud local del cono se indica con z_t . $\rho_{co}(z)$ y $\rho_{cl}(z)$ son los radios del núcleo y del revestimiento, respectivamente, a lo largo de la fibra. El cilindro azul ilustra cómo se calculan todos los valores como cilindros infinitos en cada punto a lo largo del eje z , de ahí el nombre local [5].

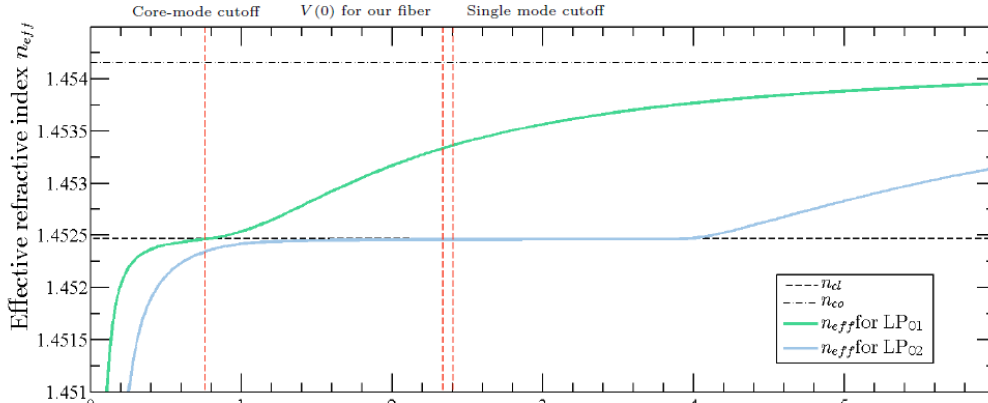


Figura 2.3-2: Índices de refracción efectivos de los dos primeros modos LP_{0m} [5].

En la figura 2.3-2 se representan los índices de refracción efectivos de los dos primeros modos LP_{0m} que se propagan en una fibra de salto de índice en función del parámetro V de guía del núcleo. El cálculo se realiza dentro de la aproximación de guiado débil y considerando el revestimiento finito [5].

Donde $\rho_{cl}(z)$ es el radio de revestimiento y $\rho_{co}(z)$ es el radio de núcleo. Estos se representan en la figura 2.3-1. Resulta que al elegir el ángulo de inclinación correcto a lo largo de la fibra es posible maximizar el acoplamiento al modo de segundo orden. Con el fin de obtener un ángulo límite inferior, vamos a comparar la longitud local del cono con la longitud de batido local. La longitud cónica local z_t se muestra en la figura 2.3-1 y se define a través de esta longitud $\Omega(z) = \tan^{-1}(\rho(z)/z_t) \approx \rho(z)/z_t$. En la práctica $\Omega(z) \ll 1$ y la aproximación queda justificada. Cuando la longitud cónica es larga en cada punto, el ángulo de estrechamiento está variando lentamente. La longitud de latido entre el modo fundamental y el modo LP_{02} está dada por $z_b = 2\pi/(\beta_{01} - \beta_{02})$, donde los subíndices se refieren a los subíndices en los modos LP_{lm} . Si la duración del batido es larga, las dos constantes de propagación son similares. Esto significa que los dos modos tienen casi la misma fase y por lo tanto son muy sensibles a los cambios a lo largo de la fibra. Podemos entender lo que sucede mirando cada uno de los modos de campo [5,15]:

$$E_{01}(r, \phi, z) \propto \epsilon_{01}(0) \exp \left\{ i \int_0^z \beta_{01}(z') dz' \right\}, \tag{7}$$

$$E_{02}(r, \phi, z) \propto \epsilon_{02}(0) \exp \left\{ i \int_0^z \beta_{02}(z') dz' \right\} \int_0^z C(z') \exp \left\{ i \int_0^{z'} \beta_{01}(z'') - \beta_{02}(z'') dz'' \right\} dz', \tag{8}$$



donde E_{01} y E_{02} son las amplitudes de campo. La primera exponencial en ambas ecuaciones describe la fase acumulada a lo largo de la fibra para el respectivo modo de campo. La integral de mantenimiento en la ecuación 8, contiene $C(z)$, que es el coeficiente de acoplamiento por unidad de longitud a lo largo del eje z , y una exponencial que depende de ambas constantes de propagación. Este término describe la cantidad de luz del modo fundamental que efectivamente terminará en el segundo modo. El coeficiente de acoplamiento se ilustra en la figura 2.3-3, determina la cantidad de luz, acoplamiento que tiene lugar desde el modo uno al modo dos. La exponencial describe que el acoplamiento de luz en el segundo modo a lo largo del eje z , acumulará fases diferentes comparadas entre sí. La integral en la exponencial, surge porque las constantes de propagación cambian a lo largo del eje de la fibra. La integral que contiene $C(z)$ será casi cero, si integramos sobre un número entero de longitudes de batido $z = nz_b$, donde n es un entero, y si $C(z)$ es aproximadamente constante dentro de esta región de integración. En este caso el campo E_{02} se hará casi cero, y casi no se produce acoplamiento [5].

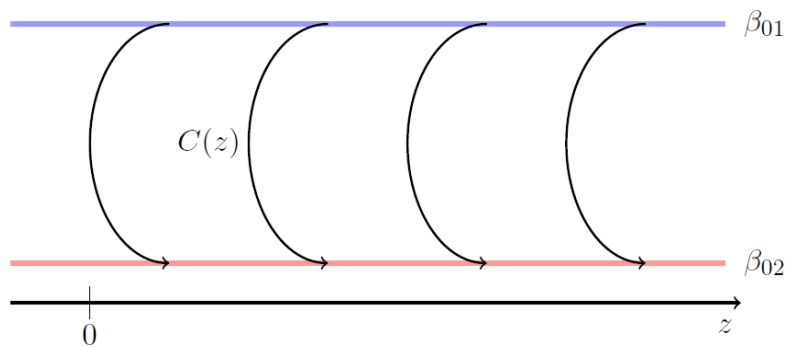


Figura 2.3-3: Las flechas ilustran el acoplamiento al modo de segundo orden, ocurre por la fuga de luz fuera del modo fundamental. $C(z)$ es el coeficiente de acoplamiento por unidad de tiempo entre los dos modos [5].

El coeficiente de acoplamiento es proporcional al ángulo de inclinación local [15], lo que significa que debe variar rápidamente dentro de una longitud de batido a fin de maximizar el acoplamiento. A partir de ahora requerimos una longitud de cono pequeña en comparación con la longitud del golpe, $z_t \ll z_b$. En el otro caso donde $z_t \gg z_b$, no se producirá apenas acoplamiento. Puesto que nos interesa el acoplamiento máximo, podemos establecer un límite $z_t = z_b$, que ciertamente debemos permanecer por encima para tener una fibra de mayor sensibilidad. El aislamiento del ángulo de inclinación en esta igualdad conduce a un límite en los ángulos para una fibra no adiabática aproximada:

$$\Omega(z) = \frac{\rho_{co}}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \tag{9}$$

La curva del ángulo límite $\Omega(z)$ de nuestra fibra se representa como una función del radio del núcleo normalizado en la figura 2.3-4. El radio del núcleo normalizado se refiere al parámetro V como $\rho_{co}(z)/\rho_{co}(0) = V(z)/V(0)$, donde $V(0) = 2,34$ es el parámetro V para nuestra



fibra sin estrechar, y $\rho_{co}(0)$ es el radio del núcleo no estrechado. El mínimo del ángulo del núcleo estrechado está en $\rho_{co}(z) = \sqrt{\rho_{co}(0)} \approx 0,55$, correspondiente a $V = 1,28$. Este punto debe ser donde los índices de refracción para el LP_{01} y LP_{02} son los más cercanos, y debe corresponder aproximadamente al lugar donde $n_{eff01} = n_{cl}$. Esto sucede en $V = 0,76$, así que en realidad vemos una diferencia bastante grande entre estos dos valores. A valores mayores que $V = 0,76$, el modo se propagará en el núcleo por la interfaz que une el núcleo y el revestimiento, y a valores menores se propagará cada vez más en el revestimiento. Aquí el aire actuará como revestimiento para el modo. Habíamos esperado que el acoplamiento entre los dos modos ocurriera cuando los dos índices de refracción estuvieran más cerca. Parece que el acoplamiento ocurre cuando el modo fundamental sigue siendo guiado por el núcleo. La fabricación de fibras que permanezca por encima de esta curva será un reto a llevar a cabo durante el proyecto [5,71].

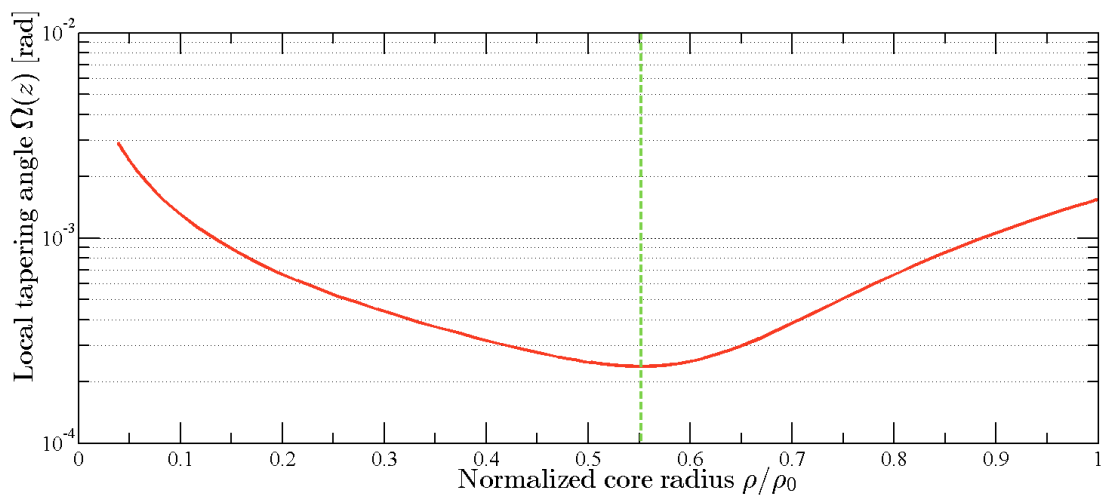


Figura 2.3-4: La curva de ángulo límite para nuestra fibra, que queremos estar por encima para hacer fibras no adiabáticas. La línea vertical discontinua indica el mínimo de la curva angular [5].

2.4 Tipos de fibras estrechadas

2.4.1 Short tapers

En general, las estructuras de fibra llamadas tapers podrían clasificarse en dos tipos: taper abrupto (no adiabático) y taper gradual (adiabático). La principal diferencia entre los dos tipos de fibras se encuentra en si hay energía luminosa en el modo del núcleo excitando a los modos de revestimiento a través de la región estrechada que será finalmente atenuada por el recubrimiento de la fibra. Por lo tanto, el ahusamiento gradual se fabrica habitualmente mediante el ahusamiento gradual de la fibra óptica con pequeños ángulos de inclinación con el fin de minimizar la pérdida de inserción y normalmente se refiere a la conicidad adiabática larga.

Sin embargo, cuando el ángulo de inclinación es suficientemente grande, es decir, la escala de longitud de cono local es mucho más pequeña que la longitud de acoplamiento entre

el modo de revestimiento fundamental y de orden superior, cierta energía en la región de núcleo estará acoplada a la región de revestimiento, la estructura ahusada forma una conicidad abrupta. La mayoría de las curvaturas cortas se refieren a los estrechamientos abruptos, que se fabrican comúnmente mediante el método de arco eléctrico utilizando programas incorporados de reducción de la fibra en una fusionadora de fibra óptica. Las regiones ascendentes y ahusadas tienen generalmente pendientes pronunciadas y la cintura cónica puede estar en el intervalo de varios micrómetros a decenas de micrómetros controlados por la magnitud del arco eléctrico, el tiempo de estiramiento y la velocidad. La figura 1 muestra un perfil de imagen típico del taper abrupto [7].

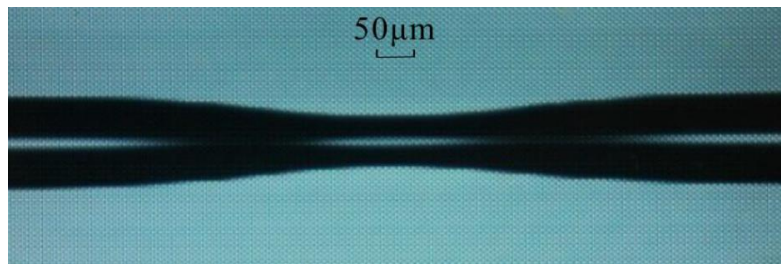


Figura 2.4.1-1: Imagen de un taper abrupto de 50μm de diámetro [7].

Recientemente, se han propuesto y demostrado en varios experimentos varios métodos de fabricación nuevos para curvaturas abruptas cortas. Por ejemplo, se empleó un láser de CO₂ pulsado de alta frecuencia con una potencia de salida media máxima de 10 W para modificar la estructura de la fibra aplicando una tensión constante a los extremos de la fibra [16]; En [17], se fabricó una conicidad abrupta compacta MI mediante empalme por fusión de la conicidad de la fibra con dos extremos de fibras cortadas normales; Un método más directo fue propuesto en [18], donde el ahusamiento brusco se realizó por fusión directa de empalme de dos extremos de fibras cortadas normales. Estos métodos proporcionan más acceso a la fabricación abrupta del taper y traen configuraciones múltiples a la estructura abrupta [7].

Para el diseño de sensores de fibra óptica basados en estrechamiento abrupto se realizan mediante la concatenación de dos tapers cortos abruptos para formar un MZI. Los dos tapers actúan como dos elementos de conducción de luz para acoplar la luz a los modos de orden superior y volver al modo fundamental. Cuando la luz de entrada pasa a través del primer taper, parte de la energía estaría acoplada a modos de orden superior debido a la pendiente pronunciada de las transiciones. En principio, cuanto más pronunciada sea la pendiente, más energía estará acoplada a los modos de orden superior y un mayor número de modos se excitará. En el segundo taper, los modos de orden superior son acoplados de nuevo al modo fundamental y la señal de interferencia de salida es el resultado del acoplamiento multimodo. Se observa que la estructura de dos tapers mejora las franjas de interferencia mucho más significativamente que la estructura de un solo taper y el revestimiento a lo largo del SMF entre los dos debe eliminarse evitando la pérdida de energía. El tamaño del taper determina el contraste y la uniformidad de las franjas de interferencia, y la distancia de separación entre los dos controla el rango espectral libre (FSR) de la señal de salida [7].



La diferencia de fase entre el modo del núcleo y los modos de revestimiento podría aproximarse como:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda} \quad (10)$$

Donde L es la separación entre los dos tapers; Δn_{eff} es la diferencia de RI efectiva entre el modo de núcleo y los modos de revestimiento; λ es la longitud de onda de entrada. Cualquier alteración en la longitud L y la diferencia de RI efectiva inducirán la variación en la fase. Cuando se utiliza una luz de banda ancha como fuente de luz para el sensor, el espectro de salida sería el espectro de interferencia inducido por las estructuras ahusadas. De este modo, el desplazamiento de los picos de atenuación podría utilizarse para monitorizar los parámetros que provocan el cambio en la diferencia de fase [7].

Los dos MZI abruptos basados en tapers han sido demostrados con alta sensibilidad a diversas perturbaciones, tales como temperatura, deformación, índice de refracción, nivel de líquido, tensión lateral y así sucesivamente [19, 20]. En otros trabajos también se logró curvatura [21], estrés lateral [22], nivel de líquido [23], y una mayor sensibilidad para mediciones RI [24]. Las mediciones mencionadas anteriormente emplearon el método de desplazamiento de longitud de onda de pico ampliamente utilizado, que podría no ser práctico cuando sólo hay pequeña diferencia entre los dos espectros. Para superar este inconveniente, un nuevo espectro de integración diferencial (SDI) método fue propuesto y demostrado como un método más confiable en un amplio rango espectral [25, 26].

Se ha probado que el método SDI también se puede utilizar con otros tipos de sensores interferométricos modales. Para mejorar el contraste de los picos de atenuación y de las sensibilidades de detección, se propuso una nueva estructura de doble paso con base cónica mediante la conexión de un espejo de fibra revestida de oro con el extremo de salida del sensor [27]. La sensibilidad se hizo casi el doble de la del sensor de una sola pasada. Recientemente se hizo una fibra asimétrica muy interesante con dos tapers continuos MZI en [28], donde los dos tapers abruptos tienen diferentes cinturas. Se ha utilizado para el sensor de inclinación direccional [7].

Un dispositivo más compacto y práctico fue hecho por solamente un taper abrupto con el recubrimiento del oro en la cara del extremo de la fibra, formando un MI en línea. Un único taper actúa como elemento de conducción de la luz que excita los modos de revestimiento, así como acopla los modos de revestimiento de vuelta al modo de núcleo. Este interferómetro de fácil fabricación ha encontrado aplicaciones en la detección de RI [29] y sensor de inclinación [30].

La fabricación de tapers abruptos en fibras insensibles a curvaturas ha traído un montón de características únicas a las fibras estrechadas abruptas basadas en línea MZI. Como se muestra en la Figura 2.4.1-2a, en la fibra insensible a la curvatura, el núcleo de sílice dopado con germanio está rodeado por un anillo de huecos llenos de gas de nano escala, que divide el área de revestimiento de fibras en las regiones de revestimiento interior y exterior. Los modos de revestimiento interior que se guían dentro de la región de revestimiento interior y los modos de revestimiento exterior que tienen distribución de energía fuera del revestimiento interior podrían ser excitados por la estructura cónica abrupta. Debido a la diferente distribución de



energía de los modos de revestimiento interior y los modos de revestimiento exterior, las influencias de las perturbaciones externas en estos modos son diferentes. Con el ajuste apropiado de las especificaciones de la configuración de ahusamiento, los modos de revestimiento interior y exterior excitados se podrían excitar y emplear selectivamente para la discriminación y mediciones de múltiples medidas de medida. Uno de los trabajos significativos fue la exitosa medición simultánea de la temperatura y el RI en [31]. La Figura 2.4.1-2b, c muestra los cambios en el espectro de transmisión del interferómetro de fibra sin deformación cónico con cambios en la temperatura ambiente y RI externo. Más parámetros, incluyendo la temperatura, la deformación axial, y RI se midieron utilizando la misma estructura en [32]. Los modos guiado y fugas en el interferómetro de fibras sin fin cónicos de insensibilidad son investigados en [33]. Este trabajo extiende el rango de operación del sensor de índice de refracción al régimen de los modos de revestimiento exterior con fugas, que es previamente inaccesible a sensores similares debido a la naturaleza compleja de la dependencia de fase de los modos con fugas en el índice de refracción externo. Además de las mediciones de los parámetros estáticos utilizando el interferómetro de insensible a deformaciones, las medidas dinámicas tales como vibraciones amortiguadas y continuas también se realizaron por primera vez utilizando este tipo de interferómetro [34]. Con la única estructura de doble revestimiento de fibra sin curvatura, es posible fabricar un MZI abrupto con base cónica sin retirar su chaqueta protectora central, lo que proporciona muchas grandes ventajas en aplicaciones de detección de vibraciones, tales como mantener una alta resistencia mecánica, Unión a un sustrato, y aislamiento de la fibra óptica de daño físico externo. Mantener la cubierta protectora central también permite una gran atenuación de los modos de revestimiento exterior, lo que deja sólo unos pocos modos de revestimiento interior que se propagan a lo largo de la fibra insensible a curvatura y garantiza una respuesta espectral más uniforme para la detección dinámica [7].

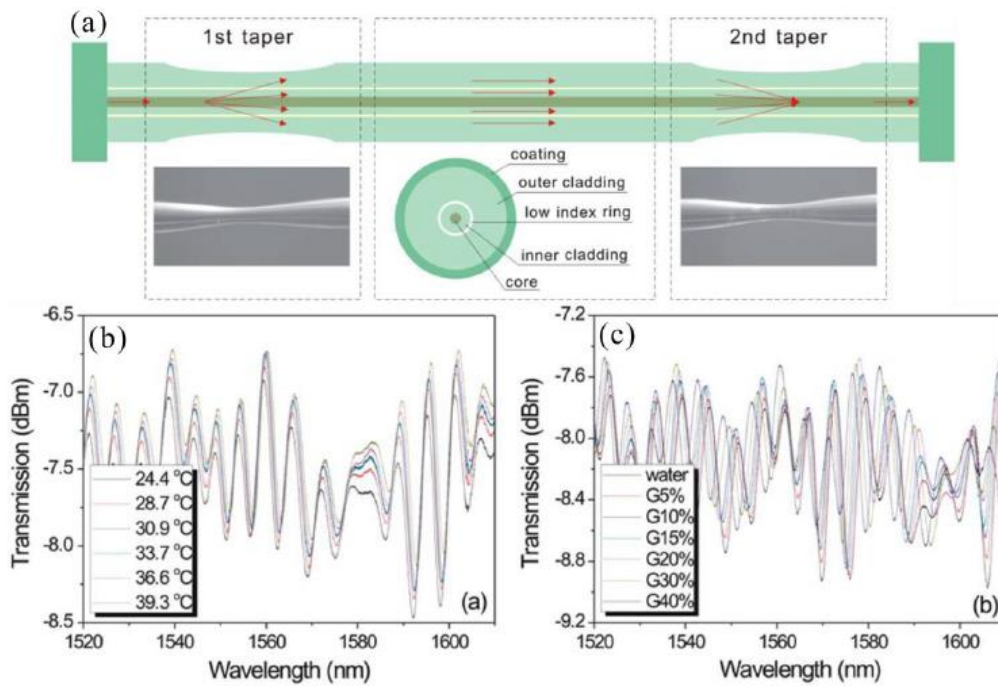


Figura 2.4.1-2: (a) Ilustración esquemática del interferómetro de fibra insensible a curvaturas; Cambio en el espectro de transmisión con un cambio en (b) temperatura ambiente y (c) RI externo [7].

2.4.2 Long Taper

2.4.2.1 Características y métodos de fabricación

El campo de onda evanescente se desintegra significativamente en la superficie exterior del revestimiento de fibras ópticas estándar, mientras que, con la introducción de fibras estrechadas largas de bajas pérdidas, la onda evanescente podría ser guiada a lo largo de la sección de cintura ahusada extremadamente fina con una considerable energía. La superposición parcial de la onda evanescente con el medio circundante podría utilizarse para mediciones del índice de refracción (RI), cuyas sensibilidades están determinadas por la profundidad de penetración y la intensidad de la onda evanescente [35-37]. Un perfil esquemático típico de la fibra larga conicidad podría encontrarse en [38] y las imágenes de microscopio de la cintura cónica y las regiones de transición podría encontrarse en [39]. El taper largo consiste generalmente en dos porciones: cintura y regiones de la transición del cono. La conicidad larga disminuye en primer lugar en diámetro hasta que se alcanza una región de cintura de diámetro constante. Luego, gradualmente aumenta de nuevo al diámetro normal de la fibra. Las imágenes microscópicas de la figura 2.4.2.1-1 muestran un ejemplo de la cintura y las regiones de transición de una típica taper de fibra larga.

Las propiedades de las fibras de fibra largas podrían controlarse fácilmente ajustando las condiciones de fabricación. La pendiente o nitidez de las regiones de transición cónicas es un

factor clave que determina las características cónicas. En general, la conicidad de fibra larga podría dividirse en dos categorías dependiendo de la pendiente del ángulo de conicidad [40]: adiabática y no adiabática. Un cono adiabático se define de acuerdo con el criterio adiabático como [38]:

$$\left| \frac{dr}{dz} \right| \leq \frac{r(\beta_1 - \beta_2)}{2\pi} \quad (11)$$

Donde β_1 y β_2 son respectivamente las constantes de propagación local, en la transición, del modo fundamental y del modo de orden superior al que es más probable que se pierda la potencia; r es el radio de la conicidad adiabática en función de z , que es la distancia a lo largo del eje longitudinal cónico. Normalmente, una conicidad adiabática tiene un cambio local muy pequeño en el radio de cono como se muestra en la figura 2.4.2.1-1a, llevando a que la mayor parte de la energía luminosa permanece en el modo fundamental y no se transfiere a modos de orden superior. Por otro lado, la conicidad no adiabática tiene un ángulo afilado más afilado como se muestra en la figura 2.4.2.1-1b y es capaz de acoplar la energía desde el modo fundamental de la fibra sin estrechar a los modos de orden superior a lo largo de la cintura del taper donde se tiene más de un modo. La diferencia de índice de refracción efectiva inducida por el material circundante entre estos modos a lo largo de la región cónica contribuiría a la diferencia de fase entre ellos y con la ayuda de regiones de transición cónicas se produciría interferencia modal y resultaría en respuesta espectral interferente [7].

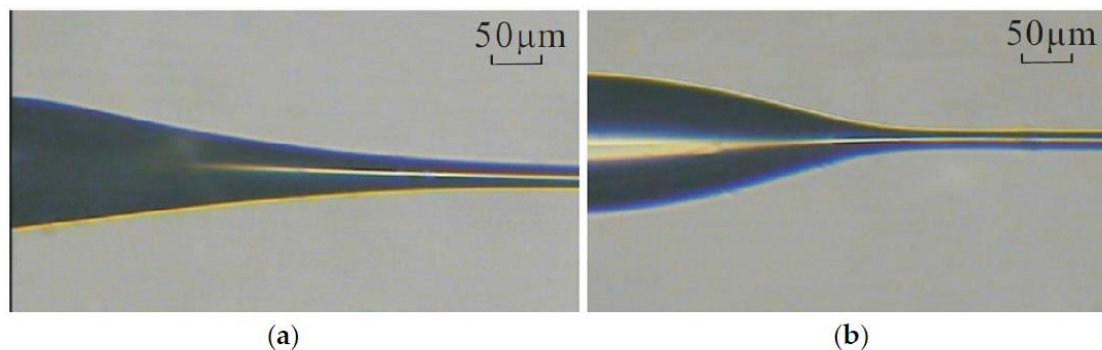


Figura 2.4.2.1-1: Taper adiabático (a), taper no adiabático (b).

2.4.2.2 Adiabatic Long Taper

Una taper largo es adiabático si el ángulo de inclinación local es lo suficientemente pequeño para que no hay transferencia de energía de luz entre los diferentes modos cuando la luz se propaga a lo largo del taper [41, 42].

En principio, la diferencia de los índices de refracción efectivos entre los modos LP_{01} y LP_{0m} determina el ángulo adiabático del ahusamiento del núcleo. Si el ángulo de conicidad del núcleo es mayor que el ángulo de conicidad adiabático, la energía del modo fundamental se



acoplará a los modos de orden superior, haciendo que la conicidad larga no sea adiabática. Los tapers largos adiabáticos se han utilizado para todos los convertidores de modo de fibra [43] y multiplexores [44].

También es capaz de acoplar la luz dentro y fuera de otras estructuras de detección para la detección bioquímica, tales como resonadores de anillo ópticos de núcleo líquido [45], microdiscos [46] y micro esferas [47]. Además, el taper adiabático se ha utilizado para la fabricación del sensor de resonancia de plasmón superficial de alta sensibilidad (SPR) para la medición del índice de refracción. Cuando la parte real de la permitividad de película delgada es negativa y de mayor magnitud que su propia parte imaginaria y la permitividad del material que rodea a la película delgada, ocurre el fenómeno de SPR. En este caso, el acoplamiento ocurre entre la luz que se propaga a través del taper y un plasmón de superficie [48]. Diferentes materiales han sido utilizados para recubrir la superficie del taper para formar sensores de plasmón de superficie para la temperatura, el índice de refracción y las mediciones de bio-sensor [49-53]. También se depositaron con éxito capas de sílice derivadas de solgel de baja pérdida en la cintura uniforme de un taper [54], que tiene la capacidad de dopar con tierras raras y otros materiales, dando lugar a una nueva clase de dispositivos de fibra total para detectar aplicaciones. Recientemente, se propuso un simple sensor de microfibra de desplazamiento sin contacto [55], utilizando un taper largo adiabático doblándolo en forma de U. El sensor es capaz de medir una distancia de desplazamiento de hasta 12 mm con una sensibilidad de 0,2 dB / mm con un diámetro mínimo de 8 μm .

2.4.2.3 Non-Adiabatic Long Taper

Debido al ángulo de inclinación relativamente afilado, el modo fundamental que originalmente transmitía a través de la fibra óptica normal transferiría parte de su energía a los modos de revestimiento en la primera transición, región de estrechamiento [56]. Por lo tanto, habría más de un modo de propagación a lo largo de la cintura cónica. En la segunda transición, todos los modos son reacoplados unos con otros, dando por resultado patrones de interferencia. En este caso, el taper largo no adiabático se comporta como interferómetro modal con una transmisión dada por:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) \quad (12)$$

Donde I es la intensidad de la señal de interferencia, I_1 e I_2 son las intensidades de la luz que se propagan en el modo fundamental y el modo de orden superior respectivamente. $\Delta\varphi$ es la diferencia de fase entre los modos de interferencia, que es aproximadamente igual a:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda} \quad (13)$$



dónde λ es la longitud de onda central de la fuente de luz; L es la longitud de la cintura del taper sobre la cual existen el modo fundamental y los modos de revestimiento; Δn_{eff} es la diferencia de índice de refracción efectiva entre los modos. Cualquier variación en la longitud L y la diferencia efectiva del índice de refracción forzarían que la diferencia de fase cambiara, dando como resultado el cambio del espectro de interferencia de salida [7].

Por ejemplo, si la temperatura del ambiente circundante de la microfibras cambia, la diferencia en las constantes de propagación y la fase relativa entre los diferentes modos será modificada, dando lugar a un cambio en la respuesta espectral.

Se ha demostrado que el acoplamiento de modos en tapers no adiabáticos puede ser controlado para que ocurra principalmente entre el modo del núcleo fundamental de la fibra normal y los dos primeros modos de la cintura del taper (HE_{11} y HE_{12}), donde la luz se propaga en el aire a lo largo de la cintura del taper. En consecuencia, la intensidad y la profundidad de penetración de los campos de onda evanescentes se refuerzan significativamente, dando lugar a una superposición mayor con el medio circundante. El medio circundante provocará un cambio en el índice de refracción efectivo del modo de orden superior en la guía de onda del taper y cambiará el valor de Δn_{eff} . Por lo tanto, los espectros responderán con desplazamiento de longitud de onda, que proporciona el parámetro que se supervisa para las mediciones RI [7].

La medición de RI es una de las aplicaciones de detección más populares usando tapers largos no adiabáticos. Los sensores se basan comúnmente en las fibras monomodo estándar (SMF) [57,58]. Al ahusar el diámetro de un SMF a menos de $1,64 \mu\text{m}$, el modo de núcleo fundamental ya no se confina y se convierte en el modo de revestimiento fundamental a lo largo de la región de la cintura, interfiriendo con el modo de revestimiento de primer orden. Este dispositivo logra una alta sensibilidad de $980 \text{ nm} / \text{RIU}$ para un rango RI de 1.332 a 1.392 [59].

Posteriormente, se propuso un taper largo no adiabático con una longitud de cintura delgada de sólo $2,4 \text{ mm}$ para aumentar la FSR hasta 80 nm y alcanzar una sensibilidad máxima de $25.667 \text{ nm} / \text{RIU}$ para la medición del RI [60]. En 2004, se utilizó un taper largo no adiabático para la detección de proteínas, realizando una sensibilidad de $1500 \text{ nm} / \text{RIU}$ para la medición del RI y de $2,42141 \text{ nm} / \% \text{ W} / \text{V}$ para la detección de la concentración de proteínas [39].

También se realizaron mediciones de desplazamiento y temperatura utilizando un taper largo con sensibilidades de $4,2 \text{ pm} / \mu\text{m}$ y $12,1 \text{ pm} / ^\circ\text{C}$, respectivamente [61]. Otra aplicación importante es la medición del campo magnético, que se ha llevado a cabo insertando el ahusamiento largo en el fluido magnético [62-64]. El RI del fluido magnético podría medirse para la cuantificación del campo magnético. La detección de hidrógeno también estaba disponible utilizando el taper largo mediante el empleo de la interacción de campo evanescente fuerte con el recubrimiento de paladio. Se observó un desplazamiento espectral de -1.99 nm con el hidrógeno inyectado de una concentración del 5% usando un taper largo con un diámetro de cintura de $3 \mu\text{m}$ [65].



3. *Taper Manufacturing Station*

En la universidad, para la realización de los tapers se cuenta con una máquina especializada. La *Taper Manufacturing Station* (TMS).

Esta máquina está diseñada para su uso en la fabricación de tapers, haces y acopladores. El TMS es un sistema dedicado a la fabricación de fibras estrechadas que proporciona un acceso fácil, control de la fuente de calor y una fuerza de tracción sin fricción. Con todo esto consigue una altísima calidad, menores pérdidas, y una mejor repetibilidad en la industria [1].

El TMS opera en un vacío parcial ya que es ventajoso para la producción de los mencionados tapers. El funcionamiento del patentado 3SEA estabilizador térmico de plasma en vacío parcial permite que la anchura del campo del plasma se expanda hasta diez veces para realización de una modulación reducida a lo largo del taper [1].

Otra ventaja adicional que brinda el operar en vacío parcial es que la oxidación de los electrodos se minimiza notablemente durante el proceso de estrechamiento de la fibra, dando como resultado tapers libres de residuos que se puedan producir en el proceso. El diseño de los electrodos permite un aumento de la capacidad de rendimiento de los sistemas laser de alta potencia. Las pruebas de alta potencia realizadas confirman que la TMS no contamina la superficie del vidrio, eliminando la necesidad de tener que realizar un proceso de grabado y reduciendo el coste de producción y reelaboración [1].

La TMS tiene tres modos de funcionamiento personalizables a la hora de la fabricación de los tapers, de una sola dirección de tracción (*Single direction tapering*), de tracción bidireccional (*bi-directional tapering*) y basado en tablas (*Table based tapering*). El método basado en tablas da al usuario la posibilidad de crear un programa personalizado de realización de tapers mientras se usa *LabView*. Programas como MATLAB o Microsoft Excel pueden ser utilizados para generar las tablas necesarias para este modo de funcionamiento [1].

Lo primero que es necesario para la realización de tapers es cargar el programa que se quiere ejecutar o utilizar uno de los que el software de la TMS trae por defecto y editarlo para obtener los parámetros que nos interesan.



Figura 3-1: Interfaz del programa Run Taper [1].

En *Run Taper* se da la opción de cargar y editar programas. Además, se puede visualizar el nivel de vacío que se tiene en la TMS a tiempo real, en reposo y en funcionamiento, y la temperatura que alcanza el arco de electrodos que se utilizan para calentar la fibra. Desde aquí también se puede ejecutar y abortar el proceso realización del taper.

Para editar los programas aparece una nueva ventana en la que se podrá cambiar todo tipo de parámetros y que será diferente para cada modo de funcionamiento.

3.1 *Single Direction Table*

Como se ha mencionado con anterioridad este modo lo que va a realizar es un estiramiento unidireccional de la fibra, esto lo que va a permitir es conseguir hacer tapers asimétricos con transiciones de diferentes longitudes.

Este método es mucho más sencillo y rápido que el bidireccional, pero si se desea conseguir nano hilos de fibra óptica va a ser prácticamente imposible de conseguir, este modo está pensado para conseguir que la parte estrechada de la fibra tenga como mínimo 10 μ m de diámetro.

Otro parámetro a tener en cuenta es el *Smoothing*, este va a marcar la suavidad de la transición del diámetro normal de la fibra al diámetro que se le indica para la zona estrecha. El *Smoothing* puede estar activo o inactivo.

También es útil cambiar según el resultado que se quiera conseguir los valores de tensión, potencia y velocidad [70].

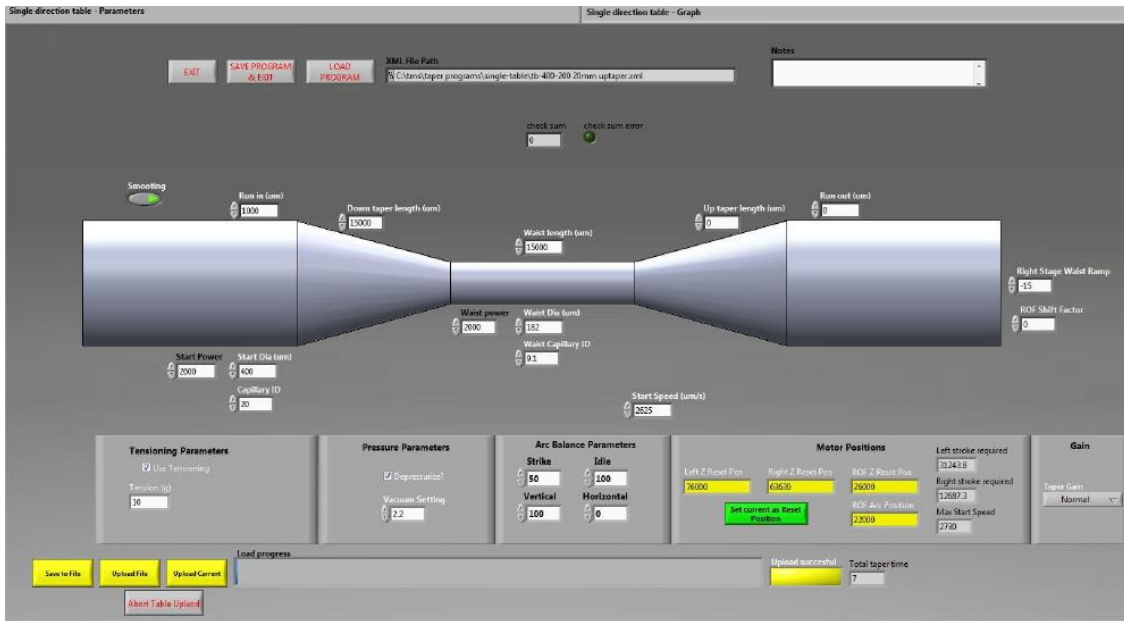


Figura 3.1-1: Interfaz de edición del Single-Direction Table [1].

3.2 Bi-direccional Table

Este modo de generar tapers va a ser mucho más complejo que el anterior. Este consiste en ir ejerciendo tracción en los dos extremos de la fibra alternativamente mientras el arco de electrodos se va desplazando por la sección de la fibra a estrechar mientras la calienta.

De esta manera conseguimos transiciones del diámetro de la fibra al indicado para la zona de la cintura del taper perfectas, sin pequeñas variaciones. Este método de fabricación permite conseguir nano hilos de fibra con transiciones abruptas. Por lo tanto, en este modo no va a tener la opción de *Smoothing* que tenía en el anterior.

Por otro lado, este modo no va a permitir generar tapers asimétricos, las dos transiciones tienen que tener la misma longitud.

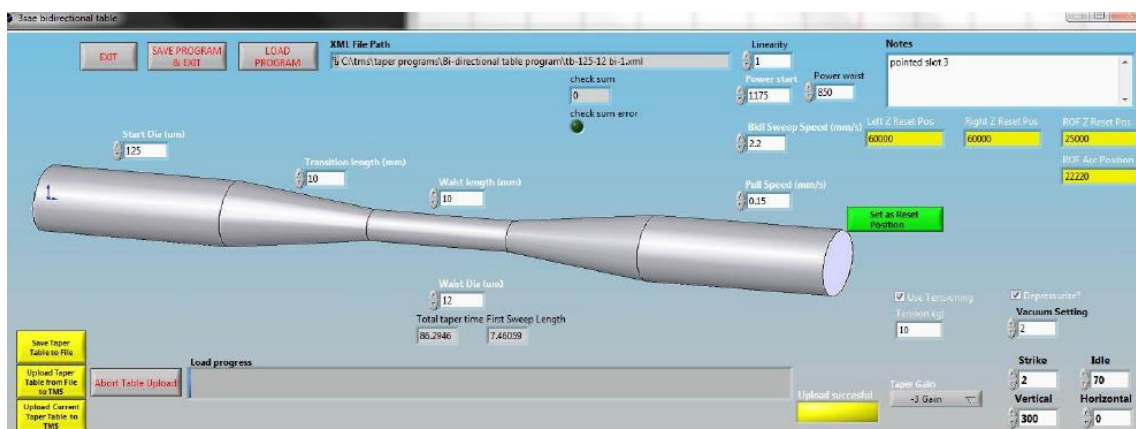


Figura 3.2-1: Interfaz de edición del Bi-Direction Table [1].



Debido a la complejidad y precisión de este modo no va a ser tan necesario modificar los parámetros que vienen por defecto, pero dependiendo del resultado que se quiera obtener será útil modificar al igual que en el caso anterior los parámetros de tensión, potencias y velocidades.

Una vez generado el taper va a ser de gran utilidad la opción disponible en Run Taper llamada *Diameter Scan*.

Mediante la cámara que tiene instalada la TMS va a realizar un seguimiento del diámetro que tiene el taper para poder observarlo por pantalla. Estos datos se pueden exportar en formato Excel.

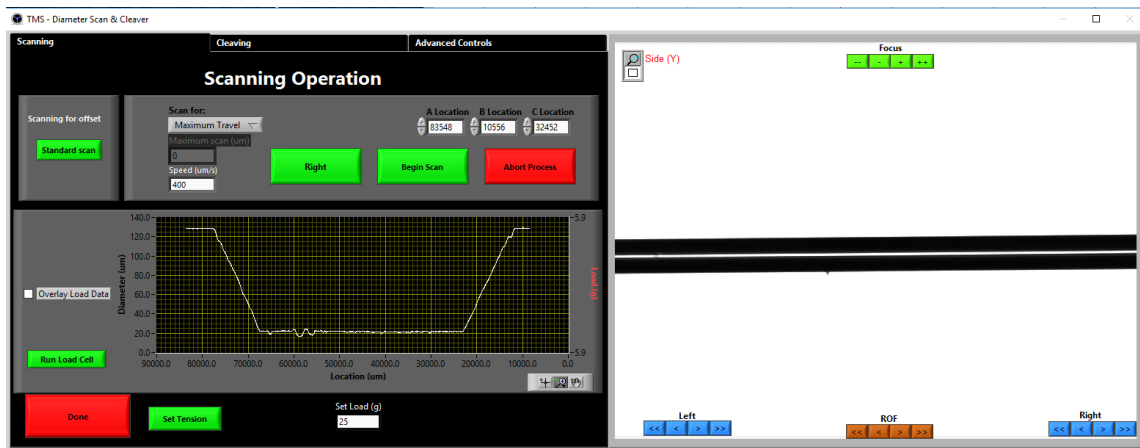


Figura 2.2-2: Interfaz Diameter Scan para realizar seguimientos del diámetro del taper.



4. Estudio experimental

En este apartado del trabajo se van a mostrar los resultados experimentales obtenidos en el estudio llevado a cabo. Con este estudio lo que se ha intentado ha sido evaluar la influencia que tiene la pendiente de la transición de los tapers en la respuesta de éstos y de su capacidad para actuar como sensores.

Se va a realizar una caracterización de diferentes tapers variando la longitud de las transiciones en ellos. Al modificar esta longitud tendremos distintas pendientes.

Una vez se haya determinado la importancia de este factor se va a elegir dos tapers de los ya caracterizados y se van a realizar distintas medidas con diferentes parámetros para determinar su sensibilidad y así poder demostrar la influencia de la pendiente a la hora de utilizar un taper como sensor.

4.1 Variación de las pendientes en las transiciones del taper para comprobar el efecto sobre su respuesta.

Para el estudio se han fabricado tapers asimétricos con el programa *Single-Direction* de la TMS ya que es el único que permite introducir valores distintos de longitud en las transiciones del taper. Debido al software de la TMS y a sus limitaciones a la hora de utilizar el programa *Single-Direction* solo vamos a poder realizar tapers con diámetros de 10 μm como mínimo, valor más que suficiente para lo que se quiere conseguir en este trabajo.

Se ha tomado como valor fijo la longitud de la cintura del taper, que va a ser de 3cm. Nos interesa que este valor sea lo más grande posible, pero se ha tenido que considerar la longitud máxima que se podía alcanzar en la fabricación de los tapers con la TMS. Los tapers van a tener una transición con un valor fijo para todos de 1 cm y se va a variar la longitud de la otra. Para este caso interesa que las transiciones sean lo más abruptas posibles por lo que al generar los tapers se mantendrá desactivada la opción de *Smoothig* en el programa de la TMS.

Para este estudio vamos a fabricar los tapers con fibra monomodo estándar con 125 μm de diámetro y se va a estrechar la fibra hasta los 10 μm .

Para un completo estudio vamos a tomar medidas a ambos lados del taper para ver la influencia de la pendiente en ambas transiciones, es decir, cómo afecta que la primera transición sea más o menos abrupta y al invertir los conectores del taper cómo afecta de la pendiente de la segunda transición.

Para estudiar el comportamiento que tiene la luz a través del taper se va a utilizar el LUNA y además se van a separar las dos polarizaciones con ayuda de un *beam splitter*.



4.1.1 Uso del LUNA

Este apartado requiere, en primer lugar, el estudio y aprendizaje del manejo y funcionamiento del reflectómetro LUNA OBR 4600. Este reflectómetro óptico proporciona una capacidad de inspección y diagnóstico sin precedentes para la industria de la fibra óptica, proporcionando aislamiento y detección de fallos, ahorrando horas de trabajo y un deterioro del rendimiento. Al ser el líder en resolución espacial con $10\ \mu\text{m}$ y sin dejar zonas muertas, determina con exactitud las pérdidas de la fibra debido a posibles curvaturas, fusiones defectuosas, etc... Además, la opción de detección distribuida ofrece una visión más completa de lo que está sucediendo en el sistema [6,72].

El software ofrece una gran cantidad de opciones, separadas en dominio del tiempo o en dominio de la frecuencia. En el dominio del tiempo, la amplitud es equivalente a una tradicional medición de reflectometría en dominio de tiempo óptico (OTDR). En cambio, la amplitud en el dominio frecuencial proporciona medidas de pérdida de retorno o retardo de grupo del sistema. La información de fase en el dominio de la frecuencia se utiliza para calcular el retardo de grupo [6].

Una vez realizado el aprendizaje se realiza la caracterización de los diferentes tapers mediante el reflectómetro óptico LUNA.

4.1.2 Uso del *beam splitter*

Para utilizar un taper como sensor interesa que, en su respuesta frecuencial, el espectro, la diferencia entre los mínimos y los máximos sea la máxima posible, esto va a marcar la capacidad como sensor de los tapers. Para poder obtener la respuesta que se busca se va a hacer uso del *beam splitter*. Por la fibra viajan dos polarizaciones y puede ser que la suma de las dos de una peor respuesta, por lo que nos interesa estas respuestas por separado.

Un divisor de haz, o *beam splitter*, es un dispositivo óptico que puede dividir un haz de luz incidente (por ejemplo, un haz de láser) en dos o más haces que pueden, o no, tener la misma potencia óptica. Existen diferentes tipos de divisores de haz y se utilizan para fines muy diferentes. Por ejemplo, se requieren divisores de haz para interferómetros, autocorreladores, cámaras, proyectores y sistemas láser [3].

En este caso se va a utilizar divisor de haz polarizante, se utiliza para dividir la luz no polarizada en dos partes polarizadas. Los divisores de haz polarizantes son divisores de haz diseñado para dividir la luz por estado de polarización en lugar de por la longitud de onda o la intensidad. Se utilizan a menudo en semiconductores o fotónica de instrumentación para transmitir la luz polarizada p , mientras que refleja la luz polarizada s . Estos divisores de haz polarizantes están diseñados típicamente para un ángulo de incidencia de 0° o 45° con una separación de 90° entre los haces, en función de la configuración [4].

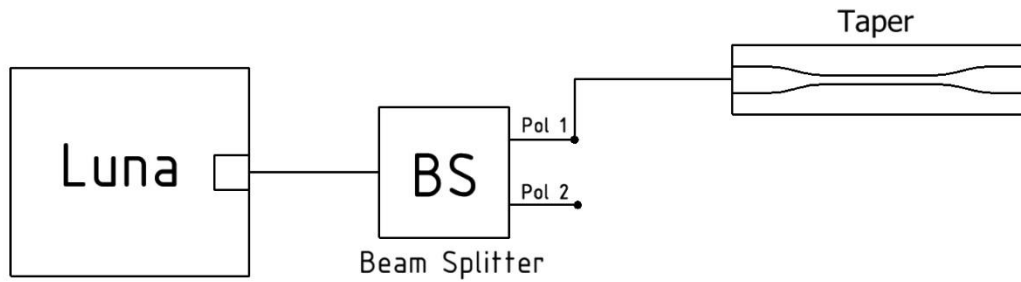


Figura 4.1.2 -3: Configuración que se ha utilizado para realizar las medidas en este apartado del estudio.

La configuración que se va a utilizar para medir la respuesta del taper va a ser la mostrada en la figura 4.1.2 -1.

4.1.3 Taper Número1

En primer lugar, se ha probado con un taper de 4.5 cm de longitud. Este tiene una transición inicial de 0.5 cm para pasar de 125 μm de diámetro a 10 μm . Tras 3cm de longitud de cintura vuelve a haber otra transición de 1cm hasta alcanzar los 125 μm de diámetro de la fibra.

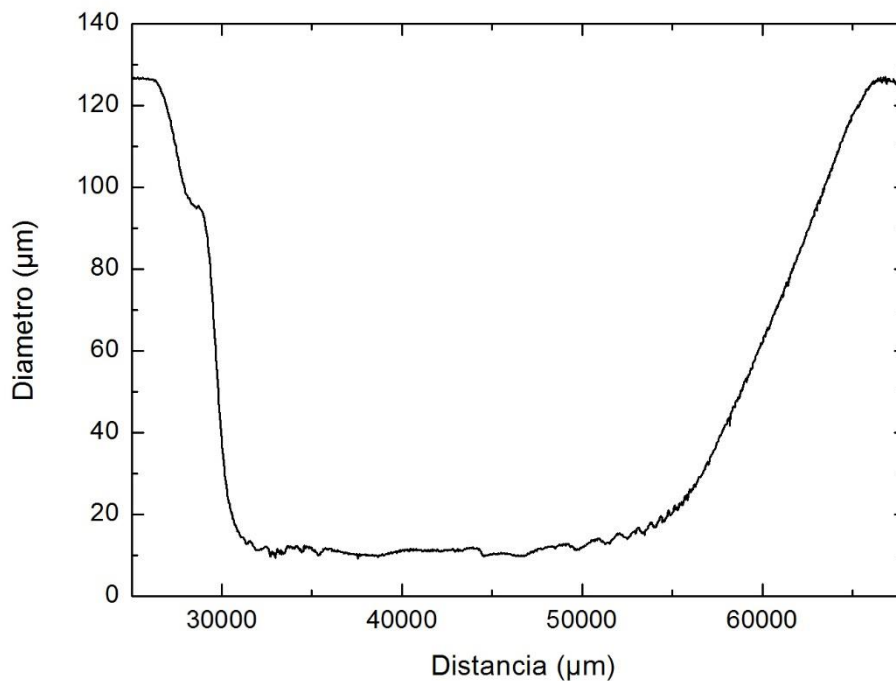


Figura 4.1.3-1: Representación del diámetro de la fibra a lo largo del taper número1, taper de longitud 4.5cm.

Como se puede observar en la figura 4.1.3-1 anterior, en la que se ha representado la variación del diámetro del taper conforme se aumenta la longitud de este, el taper además de

ser asimétrico por la diferencia de longitud en sus transiciones vemos que una de ellas tiene una pequeña variación en la forma. Esto se debe al modo de funcionamiento del modo *Single-Direction* de la TMS. Al solo generar tracción de un único extremo la primera transición la genera sin problemas, pero esa variación que se genera se debe a que se deja de ejercer tracción para recuperar el diámetro inicial de 125 μ m. Este cambio en la fuerza de tracción debería ser más suave para poder corregirlo. Se ha intentado llevar a cabo modificando los parámetros de edición que nos permite este modo de fabricación, pero no ha sido posible su completa eliminación.

Como ya se ha comentado, se va a estudiar el comportamiento de esta fibra estrechada en ambas direcciones.

4.1.3.1 *Pendiente1*

Se comienza estudiando el comportamiento del taper conectando a la salida del LUNA la transición más corta de 0.5 cm de longitud en primer lugar. Para un primer análisis se va a conectar el taper directamente a la salida del LUNA sin usar el *beam splitter* que se ha mencionado anteriormente.

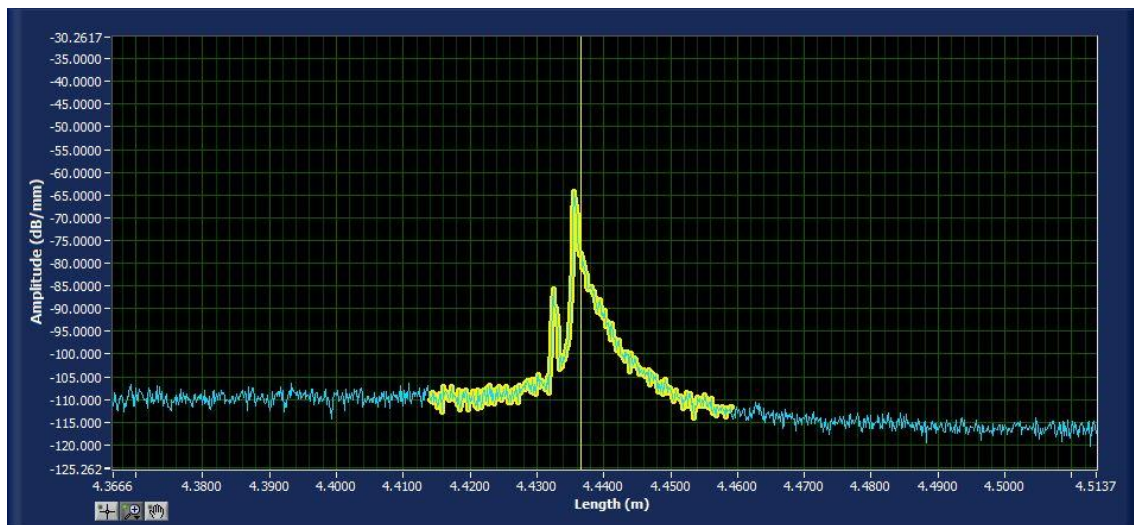


Figura 4.1.3.1-1: Respuesta en amplitud del taper número 1 con pendiente inicial de 0.5cm.

En la figura 4.1.3.1-1 se muestra lo que ocurre al introducir luz por la fibra óptica, se puede apreciar dos picos de reflexión que representan pérdidas por acoplo de los distintos modos.

Lo que se espera en un taper es que la respuesta con el LUNA este formada por tres picos, uno por la primera transición, otro por la cintura del taper y por último otro por la última transición. En este solo se tiene dos picos y además no simétricos. Esta respuesta se debe a la asimetría del taper, que provoca que la respuesta tampoco lo sea. La diferencia entre los dos picos que se observan se debe a la diferencia entre las longitudes de las transiciones. El primer pico de reflexión que se representa pertenece a la primera transición y el segundo pertenece a

la cintura del taper. Debido a la estructura del taper número 1 no se ve un tercer pico debido a la segunda transición, al tener una primera más abrupta como ya se ha visto en la parte teórica hay mejor acoplamiento entre modos y por lo tanto menores pérdidas.

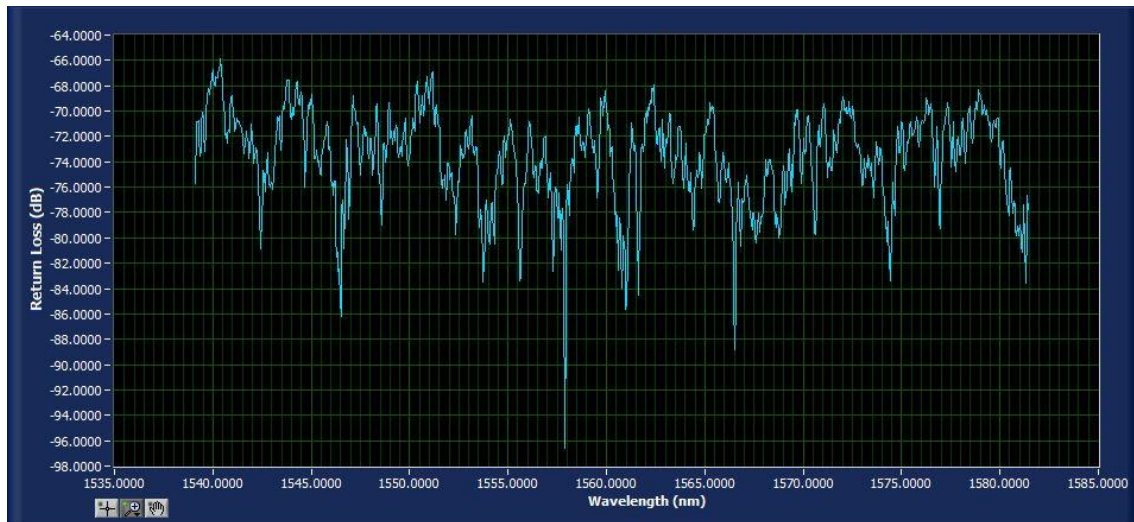


Figura 4.1.3.1-2: Pérdidas de retorno del taper número 1 con pendiente inicial de 0.5 cm.

Las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial producidas por el taper se muestran en la figura 4.1.3.1-2. Las pérdidas de retorno representan el espectro de la señal y se puede observar que la figura se asemeja levemente a la respuesta esperada [69].

El espectro del taper número 1 muestra algo de distorsión y la diferencia entre sus máximos y sus mínimos es de unos 20 dB aproximadamente. Se ha mencionado con anterioridad que para utilizar los tapers como sensores nos interesa que esta diferencia sea lo más grande posible. Para aumentar esa diferencia entre los máximos y mínimos de la respuesta frecuencial se va a intentar reducir la interferencia entre las dos polarizaciones utilizando, como ya se ha dicho anteriormente, un *beam splitter*.

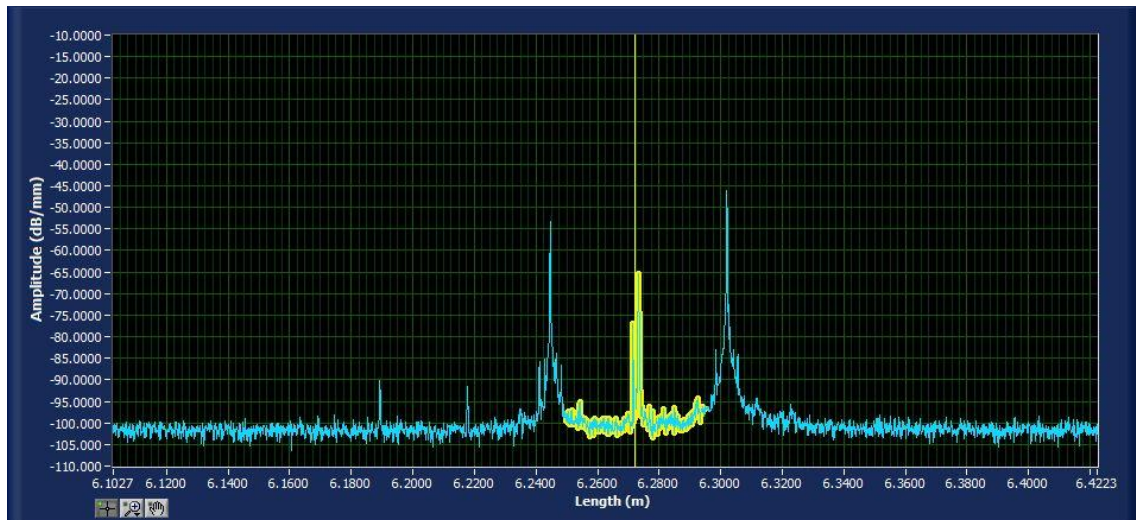


Figura 4.1.3.1-3: Respuesta en amplitud del taper número 1, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 0.5cm.

En la figura 4.1.3.1-3 se puede ver el efecto que tiene sobre la luz emitida el uso del *beam splitter*. Aquí aparecen tres picos de reflexión equiespaciados: los dos que se encuentran en los extremos tienen una amplitud mayor y conforme disminuye la amplitud de dichos picos se pueden ver pequeños picos. El que se encuentra en el centro posee la misma amplitud que la respuesta obtenida sin el *beam splitter* por lo que se deduce que representa lo que ocurre a lo largo del taper número 1. Además, los otros dos situados en los extremos no coinciden con los 4.5cm de longitud del taper, por lo que no se sabe con exactitud el motivo de la aparición de los mismos.

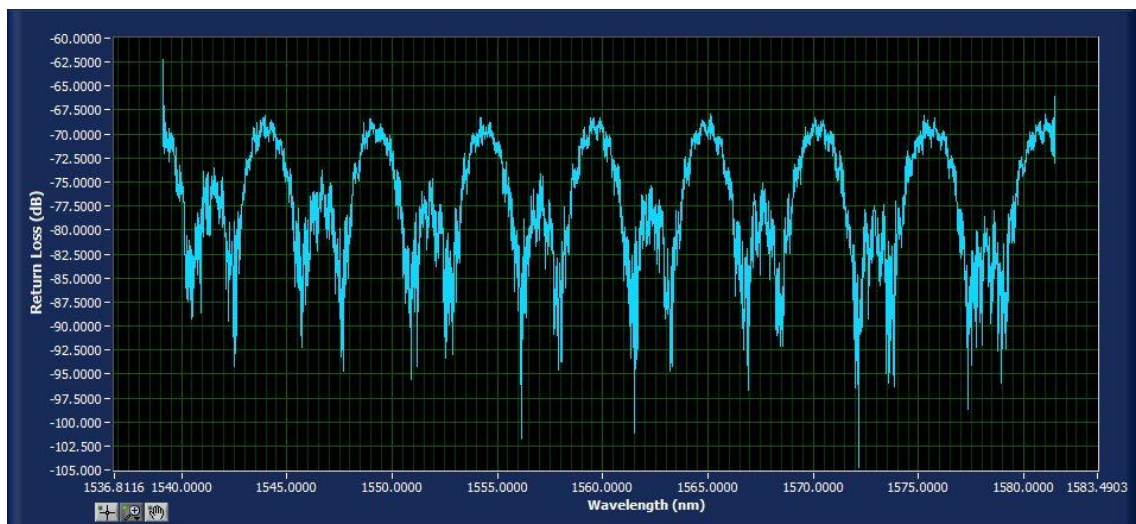


Figura 4.1.3.1-4: Perdidas de retorno del taper número 1, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 0.5 cm.

En este caso se obtiene la respuesta frecuencial que se pretendía con una diferencia entre máximos y mínimos de aproximadamente de 30 dB y en algún caso de hasta 37.5 dB. El uso del *beam splitter* ha servido para mejorar ese aspecto y poder tener resultados más

significativos a la hora de poder elegir los tapers y sus configuraciones más apropiadas para el uso de ellos como sensores.

Otro aspecto a mencionar observado en el espectro es la forma de la señal. En el apartado teórico se veía que la respuesta frecuencial de un taper tenía todos los lóbulos que componían la respuesta frecuencial de aproximadamente la misma anchura y amplitud. En este caso se observan dos tamaños diferentes de lóbulos, uno con mayor amplitud del otro, esto se puede deber a la interferencia que se produce entre los modos a lo largo del taper.

4.1.3.2 Pendiente 2

Se procede a realizar las medidas cambiando la configuración del taper. Para ello se conecta el otro extremo del taper a la salida del LUNA sin utilizar el *beam splitter*.

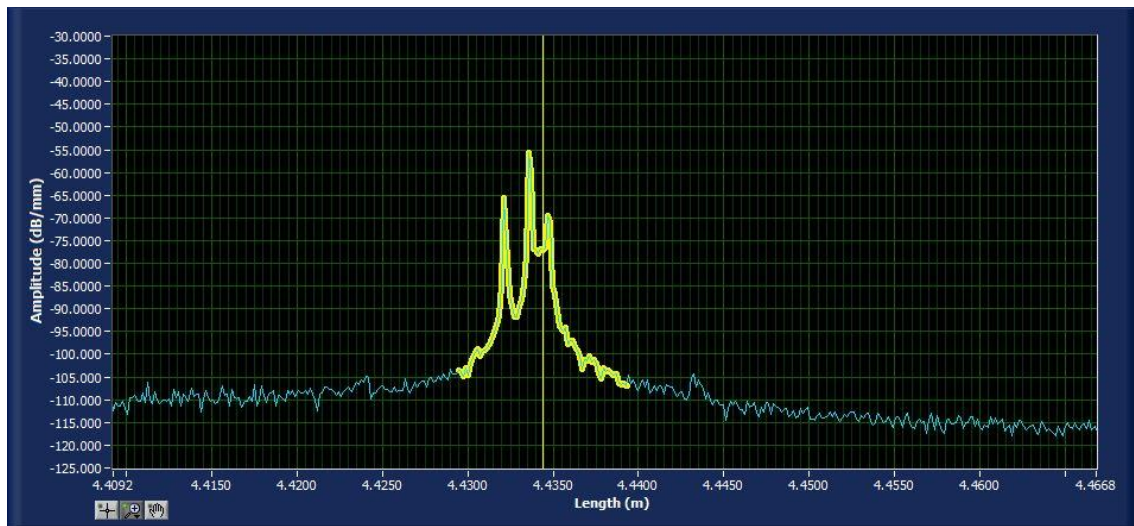


Figura 4.1.3.2-1: Respuesta en amplitud del taper número 1 con pendiente inicial de 1 cm.

Se observa una notable diferencia respecto a lo obtenido en el apartado anterior por lo que a simple vista se puede afirmar que la cambio en la configuración del taper es significativo y que la respuesta obtenida se va a ver afectada por el cambio en la pendiente de la primera transición.

Se puede ver en la figura 4.1.3.2-1 que el primer pico de reflexión generado por la transición inicial tiene mayor amplitud y en este caso sí que se aprecia un pequeño pico generado por la segunda transición. El pico de reflexión de mayor valor alcanza en este caso los -55dB de amplitud casi 10 dB por encima de lo obtenido para la otra configuración.

El espectro que se obtiene en la figura 4.1.3.2-2 es diferente al obtenido para la configuración anterior, es normal que, si la respuesta del taper al introducir luz con el LUNA es diferente, también lo sean sus pérdidas de retorno en el dominio frecuencial.

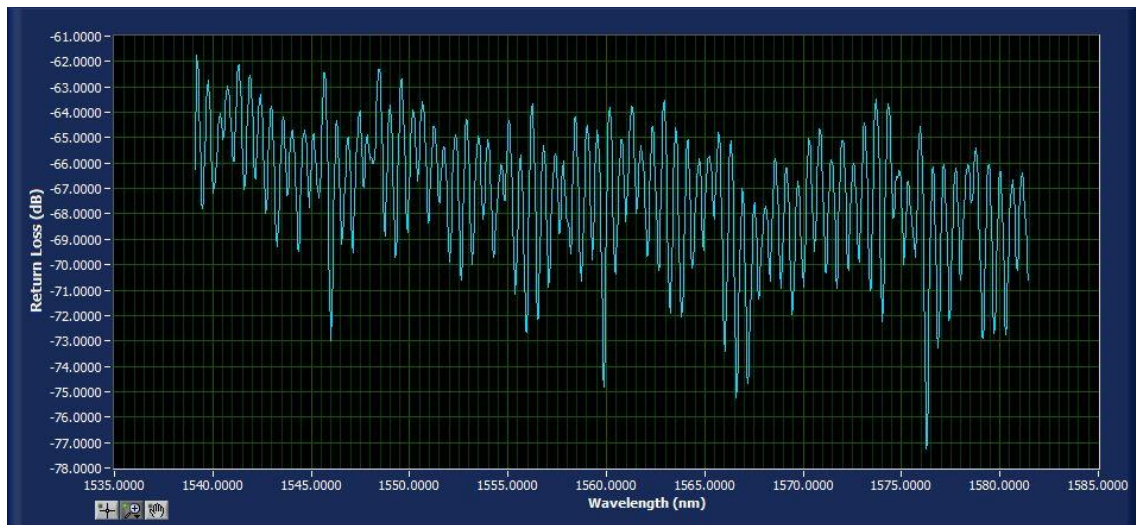


Figura 4.1.3.2-2: Pérdidas de retorno del taper número 1 con pendiente inicial de 1 cm.

Al igual que para el caso anterior va a ser interesante observar la respuesta frecuencial con ayuda del *beam splitter* por lo ya mencionado.

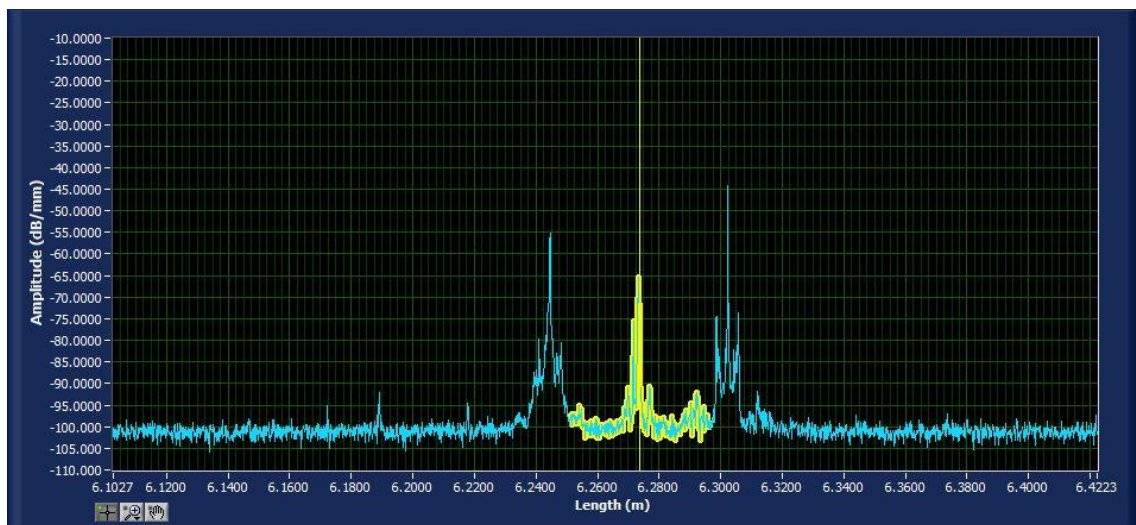


Figura 4.1.3.2-3: Respuesta en amplitud del taper número 1, tras el *beam splitter*, con pendiente inicial de 1cm.

En la figura 4.1.3.2-3 se observa que vuelven a aparecer tres picos de reflexión equiespaciados. Los dos que se encuentran en los extremos siguen teniendo una amplitud mayor y conforme disminuye la amplitud de estos se puede ver pequeños picos pero que en este caso son más significativos que en el caso anterior. El pico de reflexión que se encuentra en el centro posee la misma magnitud que la respuesta obtenida sin el *beam splitter* por lo que se vuelve a deducir que representa lo que ocurre con el taper número 1. Además, el situado en último lugar tiene el valor de amplitud más grande en ambos casos y junto con el primero no coinciden con los 4.5cm de longitud del taper.

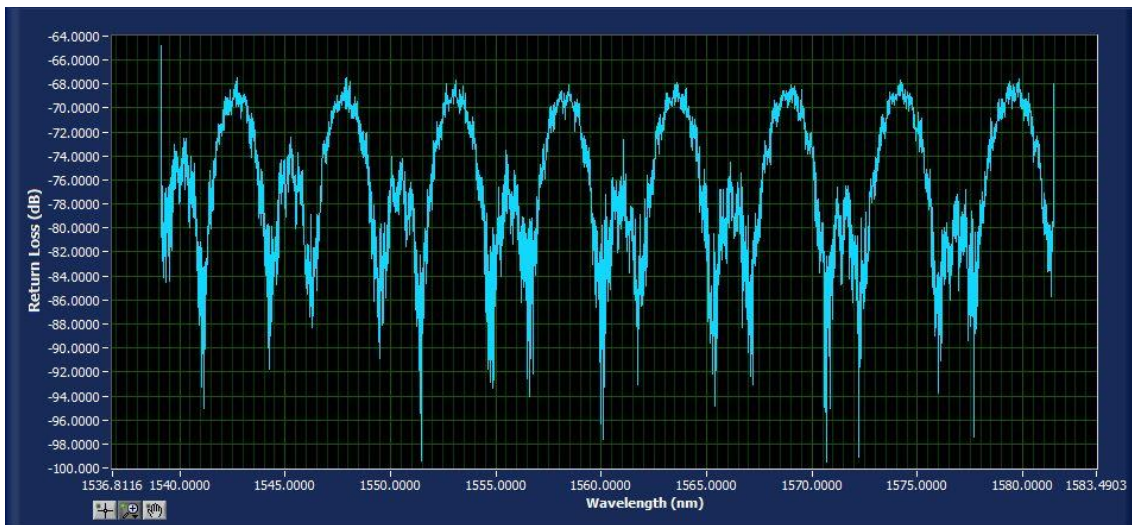


Figura 4.1.3.2-4: Pérdidas de retorno del taper número 1, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1 cm.

Las pérdidas de retorno que se muestran en la figura 4.1.3.2-4 presentan la misma forma que para la pendiente de 0.5cm de longitud. Aparecen alternamente lóbulos de menor tamaño.

En este caso se obtiene la respuesta frecuencial con una diferencia entre máximos y mínimos de aproximadamente de 24 dB y en alguno caso de hasta 32 dB. El uso del *beam splitter* ha servido nuevamente para mejorar ese aspecto y poder tener mejores resultados. Esta diferencia entre máximos y mínimos es menor que en la configuración anterior por lo que suponiéndose prevé que para el resto de medidas con este taper probablemente se van a obtener mejores resultados colocando la transición de 0.5 cm en primer lugar.

4.1.4 Taper Numero2

En segundo lugar, se ha sumado 0.5 cm de longitud a la transición inicial probado así con un taper de 5 cm de longitud. En este caso se trata de un taper simétrico que se va a poder comparar con los demás casos. Por lo tanto, tiene una transición inicial de 1 cm para pasar de 125 μ m de diámetro a 10 μ m. Tras 3cm de longitud de cintura vuelve a haber otra transición de 1cm igual que la del taper 1 hasta alcanzar los 125 μ m de diámetro de la fibra.

A continuación, en la figura 4.1.4-1 se muestra cómo va cambiando el diámetro de la fibra en función de la longitud del taper. Como con el taper número 1, en la transición en la que se va modificando el valor de su longitud nos sigue apareciendo esa pequeña variación del diámetro que impide tener una transición limpia. En este caso que el taper es simétrico se puede apreciar claramente que ambas transiciones no son iguales por lo mencionado anteriormente, el modo de funcionamiento de la TMS en el *Single-Direction* impide que sean completamente iguales.

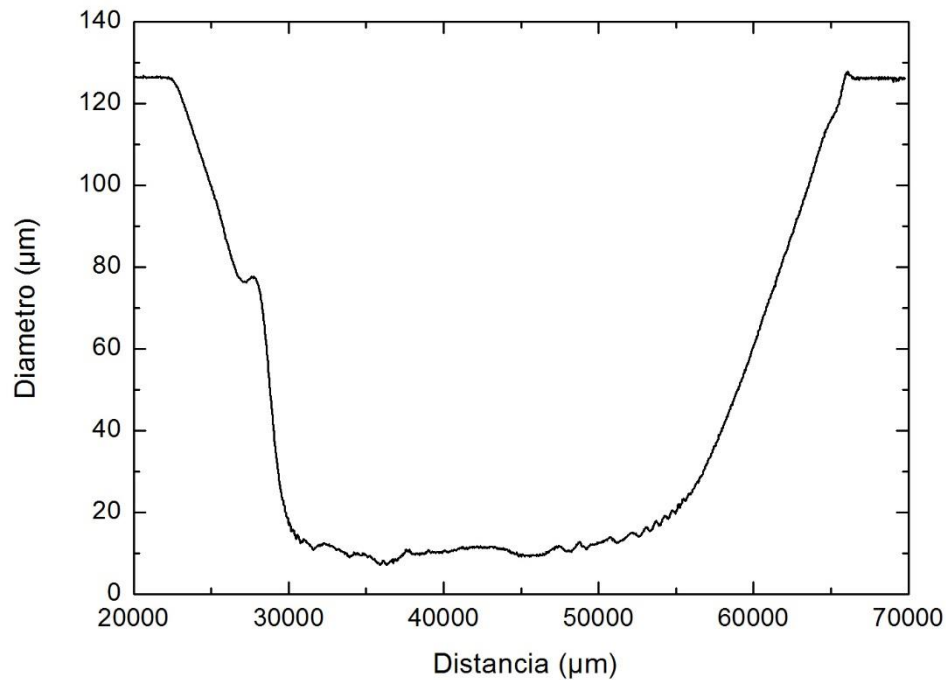


Figura 4.1.4-1: Representación del diámetro de la fibra a lo largo del taper número 2, de 5cm de longitud.

A pesar de todo esto se va a suponer que son idénticas ya que su longitud lo es y tras estudiar los resultados obtenidos al evaluar la respuesta del taper en ambas direcciones se puede afirmar que la respuesta es la misma, por lo que se va a escoger un único sentido y va a ser con el que vamos a realizar el estudio.

4.1.4.1 Pendiente 1

Se ha elegido aleatoriamente uno de los dos extremos del taper y se ha conectado a la salida del LUNA sin utilizar el *beam splitter*.

En la figura 4.1.4.1-1 se muestra la respuesta que tiene la luz que emite el LUNA a través del taper. Se puede observar que cambia respecto a la vista en el taper número 1 y no se asemeja a ninguna de las dos anteriores.

Se puede apreciar que en este caso la respuesta que se observa también presenta varios picos de reflexión, pero al contrario que pasaba con el taper número 1 aquí muestra una respuesta aparentemente simétrica. Esto se debe a que el taper, como ya se ha mencionado, es simétrico.

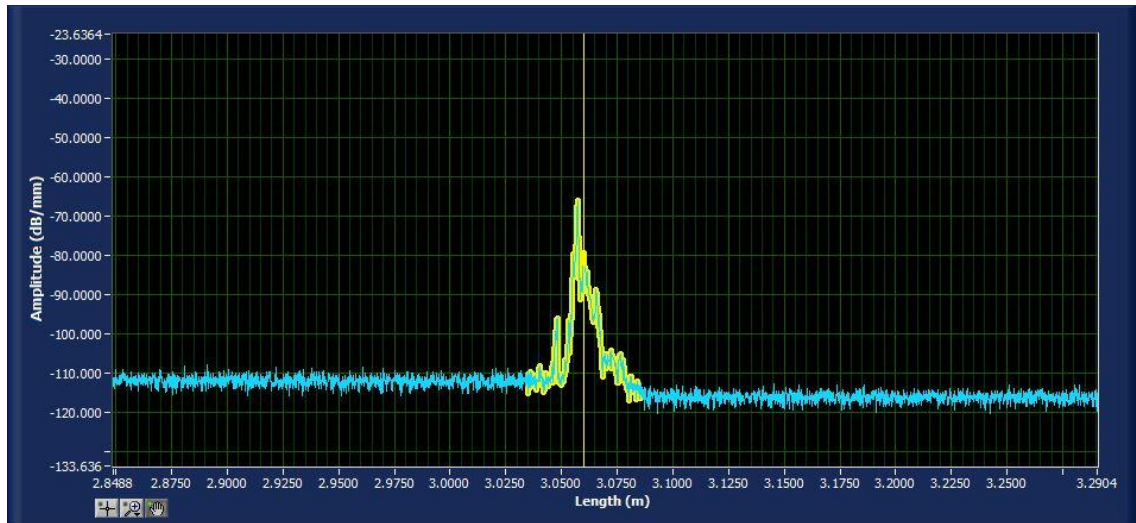


Figura 4.1.4.1-1: Respuesta en amplitud del taper número 2 con pendiente inicial de 1 cm.

A continuación, se muestra el espectro de la señal. Se puede apreciar más distorsión que en el espectro que se obtenía para el taper número 1. La diferencia entre sus máximos y sus mínimos es de aproximadamente 10 dB. Como ya se podía predecir se va a necesitar de nuevo separar las polarizaciones para poder obtener una respuesta mejor, menos distorsionada y que se asemeje a lo esperado.

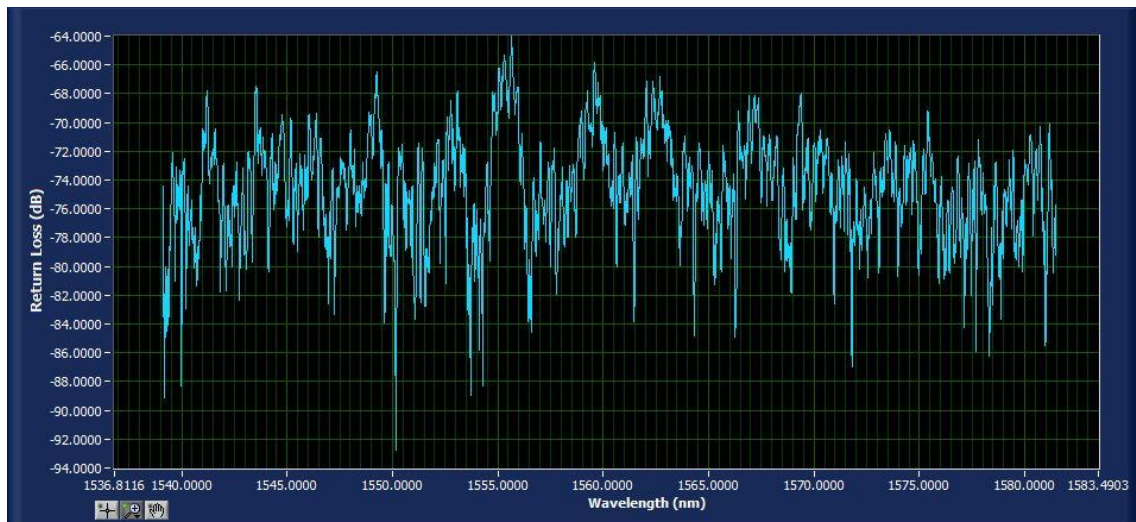


Figura 4.1.4.1-2: Pérdidas de retorno del taper número 2 con pendiente inicial de 1 cm.

Tras utilizar la configuración con el *beam splitter* se obtiene la respuesta en magnitud de la señal de luz que se observa a continuación en la figura 4.1.4.1-3.

Se vuelve a tener esos dos picos de reflexión al inicio y al final del taper y que además siguen sin coincidir con este caso los 5cm de longitud del taper.

El pico que se encuentra en el centro y que suponemos representa la respuesta del taper, en este caso no presenta la misma amplitud que la obtenida sin el *beam splitter* al contrario que para el taper número 1 en el que si coincidía la amplitud en ambas configuraciones.

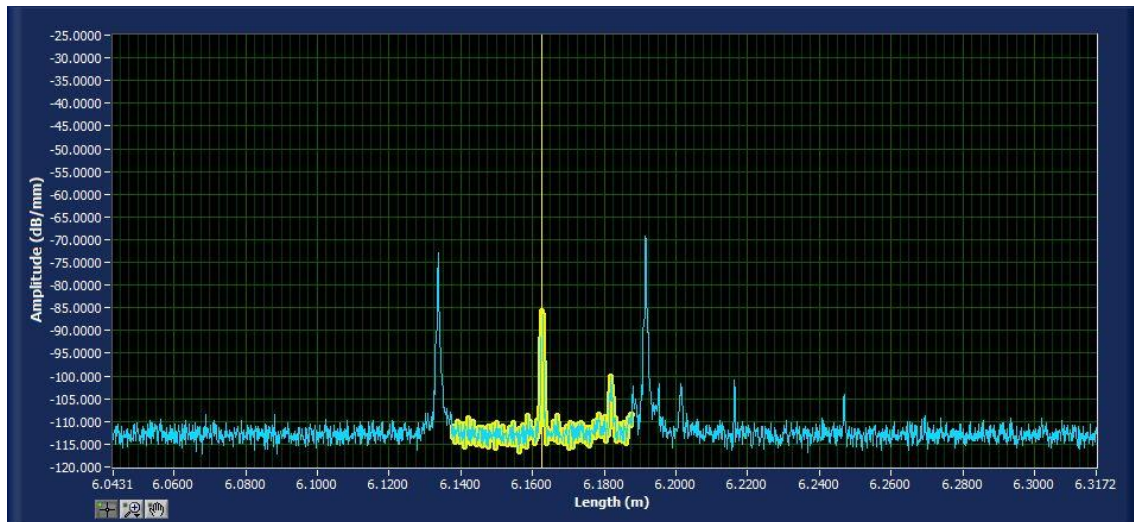


Figura 4.1.4.1-3: Respuesta en amplitud del taper número 2, tras el *beam splitter*, con pendiente inicial de 1cm.

El espectro obtenido de una única polarización vuelve a parecerse a la respuesta esperada, pero este tiene más distorsión que los que se obtenían para el taper número 1.

La diferencia entre máximos y mínimos en el espectro es inferior al obtenido para los dos casos del taper número 1, se tiene una diferencia de aproximadamente unos 18 dB, la misma diferencia que se obtenía sin ayuda del *beam splitter*, por lo tanto, ya se prevé que el taper número 2 va a tener menor sensibilidad que el taper número 1.

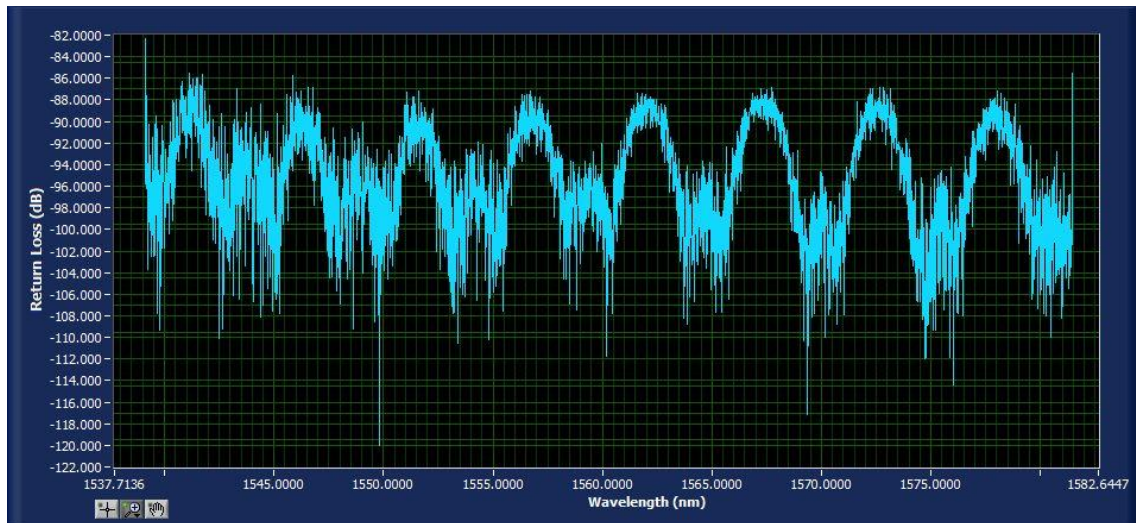


Figura 4.1.4.1-4: Perdidas de retorno del taper número 2, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1 cm

4.1.5 Taper Numero3

En tercer lugar, se ha vuelto a sumar 0.5 cm de longitud a la transición inicial probando así con un taper de 5.5 cm de longitud. En este caso volvemos a tener un taper asimétrico que va a constar de una primera transición de 1.5 cm para pasar de 125 μ m de diámetro a 10 μ m. Tras 3cm de longitud de cintura vuelve a haber otra transición de 1cm igual que la de los anteriores tapers hasta alcanzar los 125 μ m de diámetro de la fibra.



A pesar de que se sigue aumentando la longitud de la transición, que presenta una pequeña variación en el valor del diámetro a mitad de la transición, no se consigue mitigar ese efecto, se podría decir incluso que aumenta conforme se aumenta la longitud de la transición.

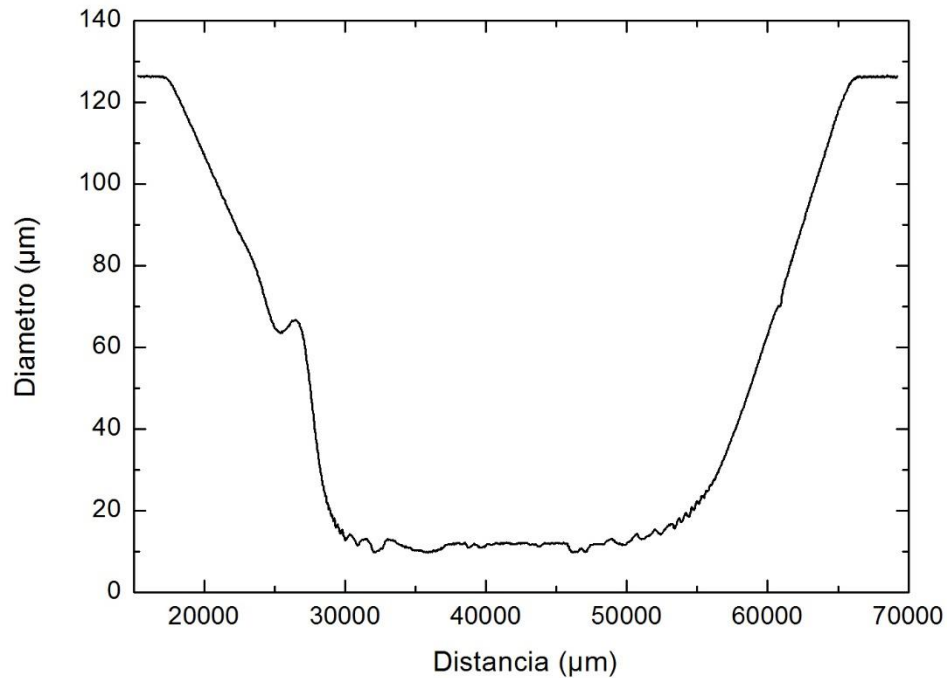


Figura 4.1.5-1: Representación del diámetro de la fibra a lo largo del taper número3, taper de longitud 5.5cm

4.1.5.1 Pendiente 1

Se comienza estudiando el comportamiento del taper conectando en primer lugar la transición más larga de 1.5 cm de longitud a la salida del LUNA.

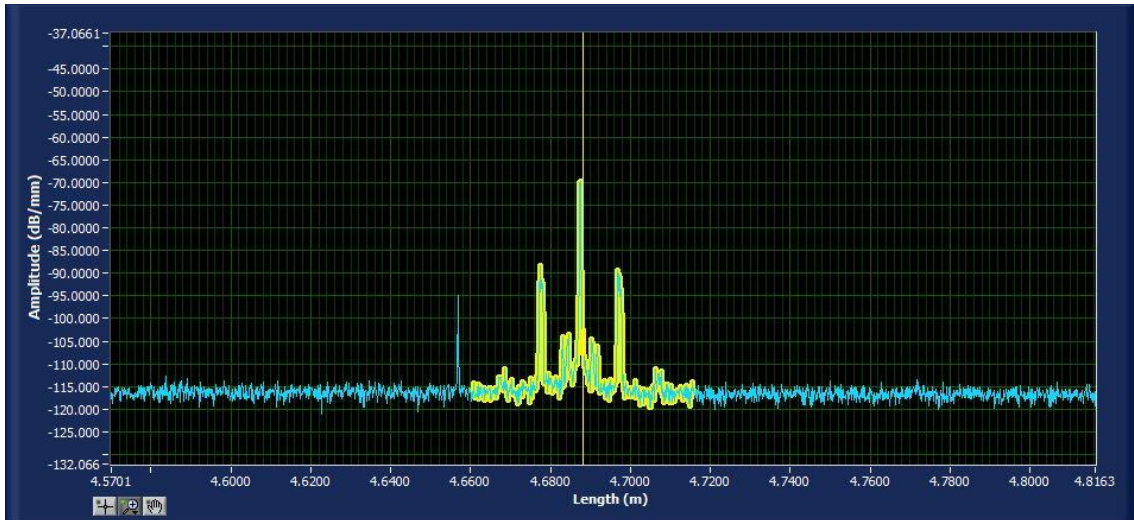


Figura 4.1.5.1-1: Respuesta en amplitud del taper número 3 con pendiente inicial de 1.5 cm.

En la figura 4.1.5.1-1 se puede observar como para este caso se ven mucho más definidas los tres picos de reflexión que representan las reflexiones en cada una de las etapas del taper.

A pesar de que se trata de un taper asimétrico la respuesta en amplitud que nos da el LUNA es simétrica.

Las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial que se obtienen para esta configuración con el taper número 3 poseen una forma que se asemeja bastante a lo esperado. A pesar de eso el espectro está algo distorsionado y en este caso se puede distinguir la diferencia existente entre los máximos y los mínimos que es de apenas unos 2.2 dB aproximadamente.

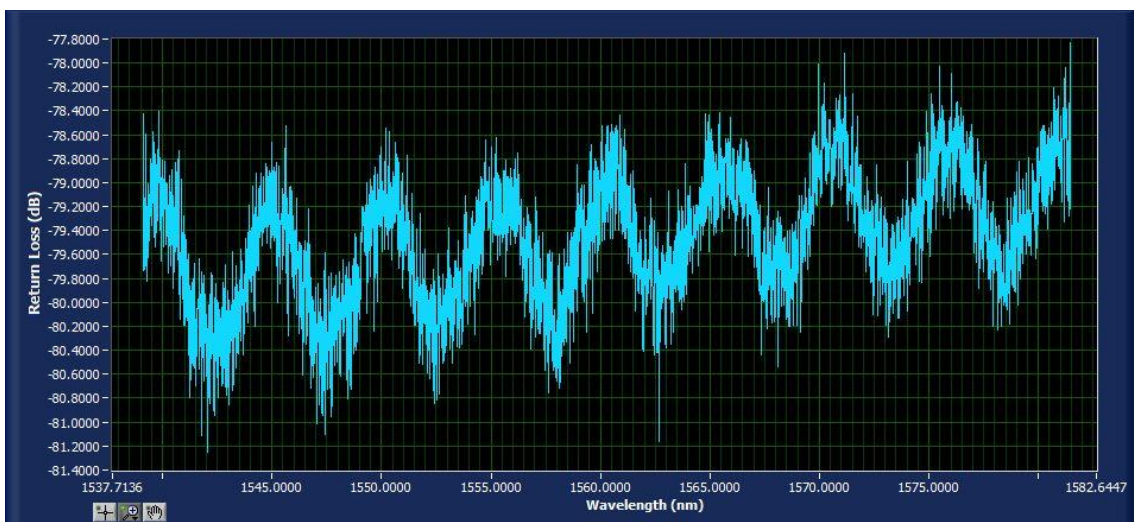


Figura 4.1.5.1-2: Pérdidas de retorno del taper número 3 con pendiente inicial de 1.5 cm.

Se va a probar de nuevo el uso del *beam splitter* para ver si la respuesta mejora.

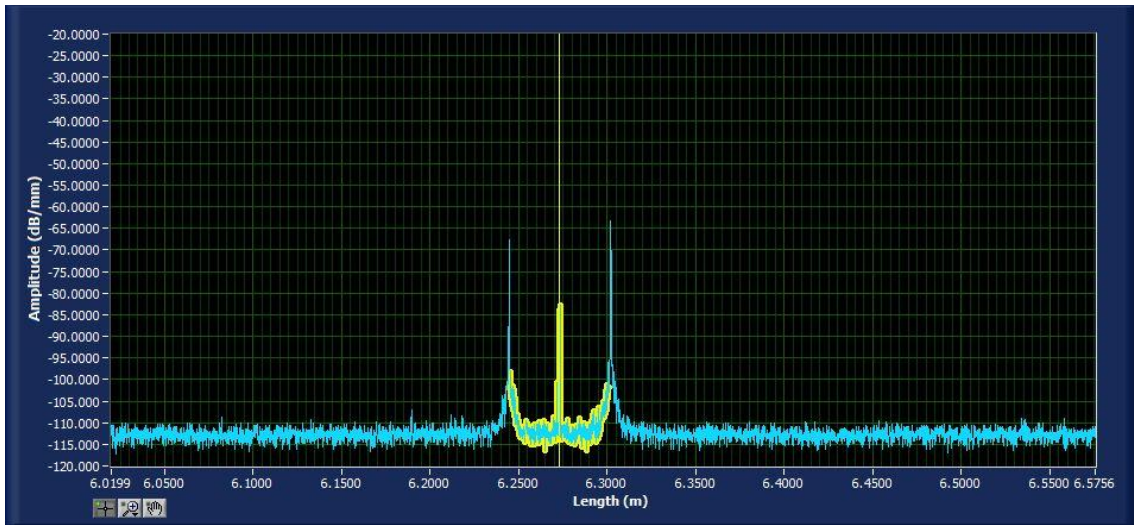


Figura 4.1.5.1-3: Respuesta en amplitud del taper número 3, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1.5cm.

Tras tomar medidas con el *beam splitter* se muestra lo obtenido en la figura 4.1.5.1-3. Se vuelve a obtener tres picos de reflexión claramente diferenciados de los cuales los dos situados en los extremos tienen mayor amplitud. La distancia entre los distintos picos sigue siendo la misma que en todos los casos anteriores, casos en los que se han realizado medidas con el *beam splitter*. La diferencia es que el tamaño del taper es 0.5 cm mayor y su longitud abarca una pequeña parte de los “valles” de los dos picos de reflexión.

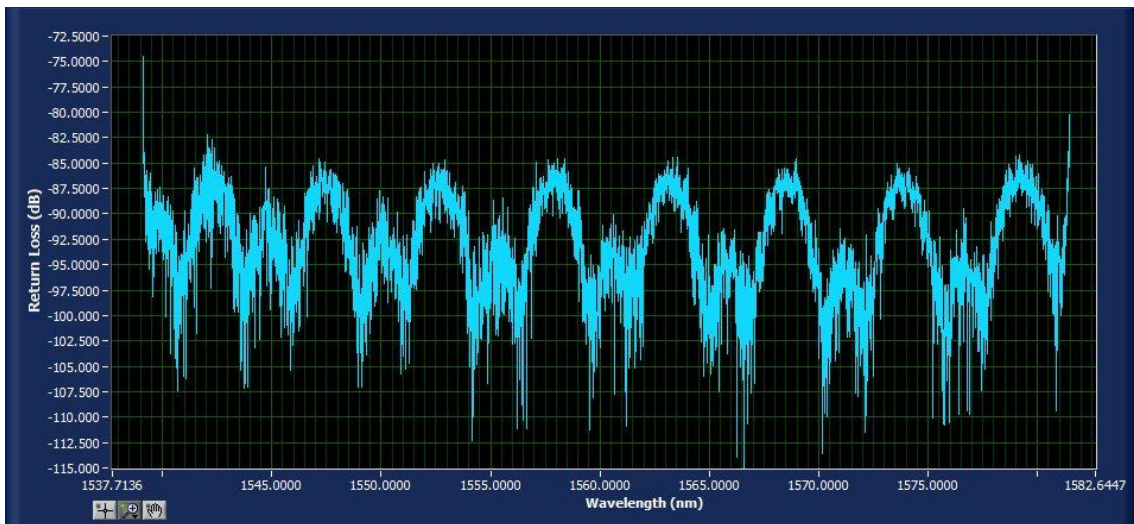


Figura 4.1.5.1-4: Pérdidas de retorno del taper número 3, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1.5 cm

Las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial se muestran en la figura 4.1.5.1-1. La diferencia entre máximos y mínimos en el espectro es de aproximadamente de unos 20 dB.



4.1.5.2 Pendiente 2

Se cambia ahora la configuración del taper número 3 y se conecta el extremo con la transición más corta del taper directamente a la salida del LUNA.

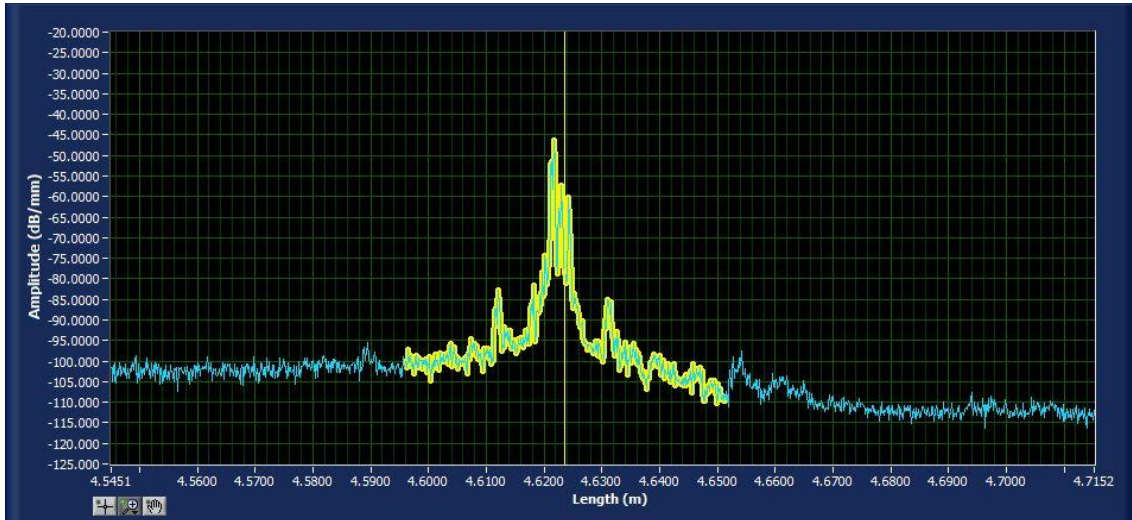


Figura 4.1.5.2-1: Respuesta en amplitud del taper número 3 con pendiente inicial de 1cm.

En la figura 4.1.5.2-1 se puede apreciar la repuesta que se obtiene al atravesar la luz la longitud del taper número 3. Se observan los tres picos de reflexión que conforman la respuesta, los dos picos pertenecientes a las transiciones vuelven a ser de menor tamaño y el pico perteneciente la cintura del taper es mucho más ancha y alcanza los -50 dB/mm.

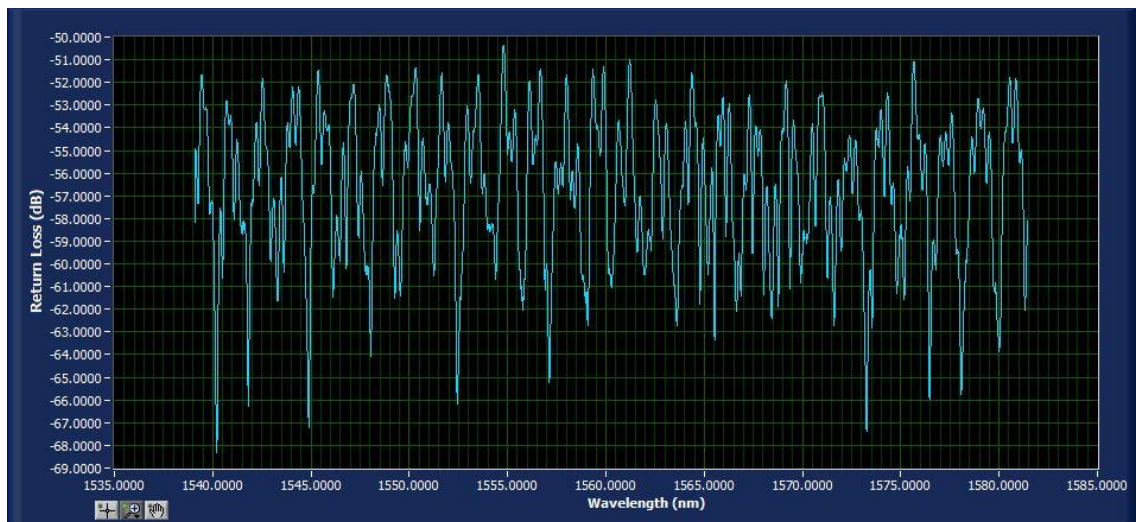


Figura 4.1.5.2-2: Pérdidas de retorno del taper número 3 con pendiente inicial de 1 cm.



En la figura 4.1.5.2-2 se muestra las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial. Se puede diferenciar perfectamente la forma de la señal, tiene muy poca distorsión y la diferencia entre sus máximos y sus mínimos es de aproximadamente 6 dB, diferencia de mayor tamaño que la obtenida para la configuración anterior del taper número 3.

Una vez más se va a probar si con la ayuda del *beam splitter* se mejora la forma de la señal y si esta diferencia consigue aumentar.

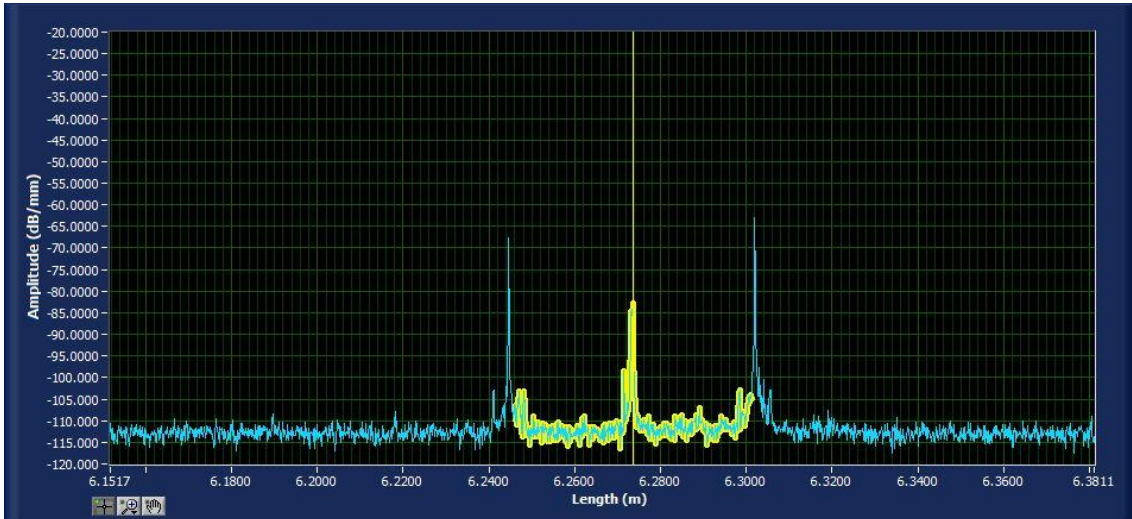


Figura 4.1.5.2-3: Respuesta en amplitud del taper número 3, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1cm

Se vuelve a obtener una respuesta en amplitud compuesta por tres picos de reflexión claramente diferenciados. Una vez más los dos situadas en los extremos tienen mayor amplitud y esta vez el situado en el centro no mantiene el valor de amplitud que presentaba la respuesta del taper sin el uso del *beam splitter*, ahora su magnitud es de -80dB/mm. La distancia entre los picos sigue siendo la misma que en todos los casos anteriores. Se ha incrementado la longitud del taper 0.5 cm y ahora su longitud abarca al igual que para el caso anterior parte de los “vayes” de las dos deltas.

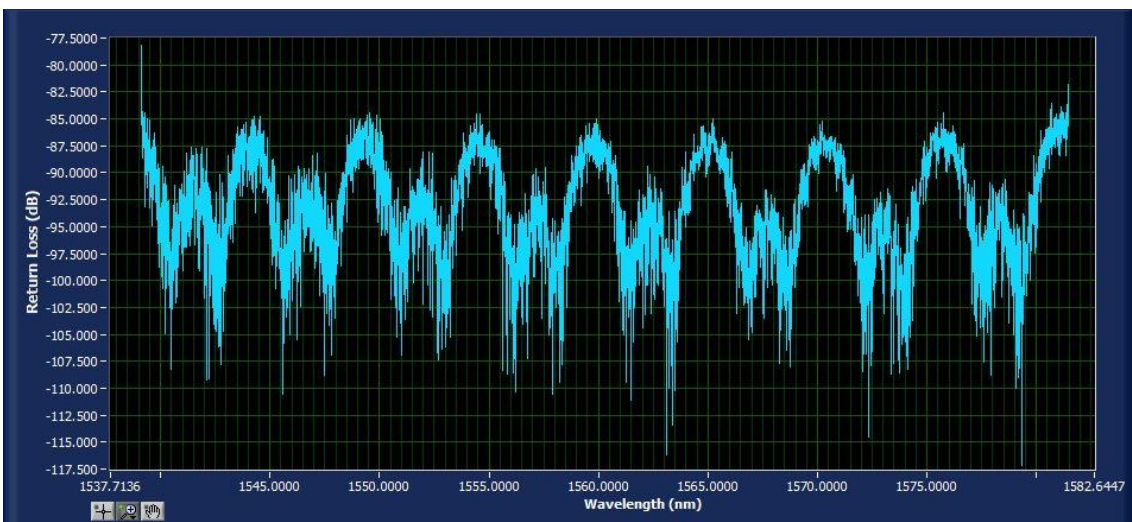


Figura 4.1.5.2-4: Perdidas de retorno del taper número 3, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1 cm



El espectro que se observa en la figura 4.1.5.2-4 muestra una respuesta muy parecida a la obtenida para el caso anterior. En esta se puede observar una diferencia entre los máximos y mínimos de la respuesta frecuencia de unos 20 dB aproximadamente.

4.1.6 Taper Numero4

Por último, se ha vuelto a incrementar en 0.5 cm de longitud la transición inicial probando así con un taper de 6 cm de longitud. Una vez más se va a tratar de un taper asimétrico que va a constar de una primera transición de 2 cm para pasar de 125 μm de diámetro a 10 μm . Tras 3cm de longitud de cintura vuelve a haber otra transición de 1cm igual que la de los anteriores tapers hasta alcanzar los 125 μm de diámetro de la fibra.

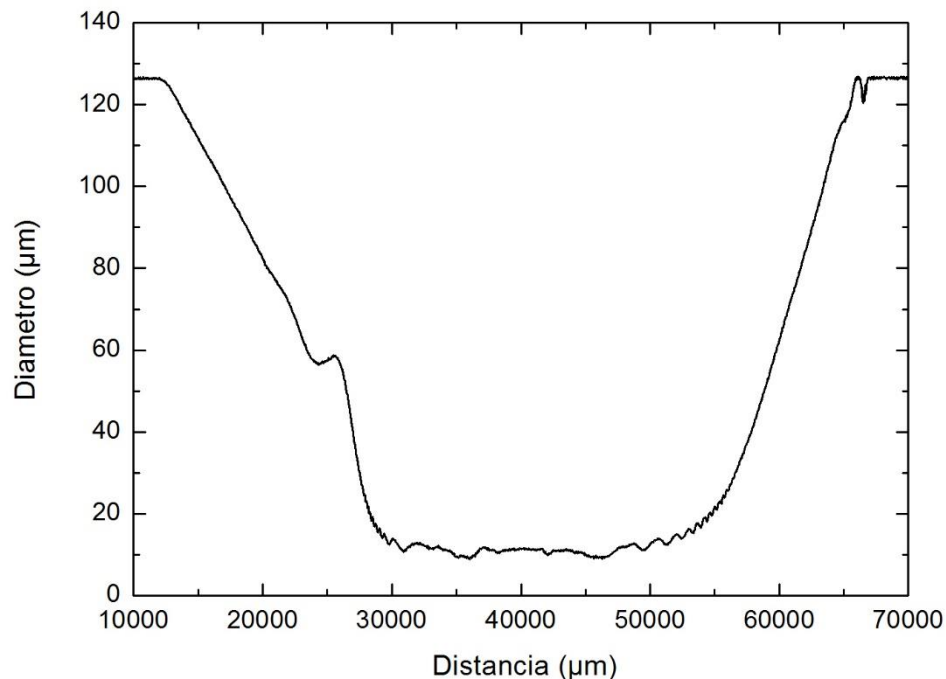


Figura 4.1.6 -1: Representación del diámetro de la fibra a lo largo del taper número4, taper de longitud 6cm

La variación del valor del diámetro se sigue viendo alterado a mitad de la transición, se sigue sin poder mitigar ese efecto.

4.1.6.1 Pendiente 1

Para este taper número 4 se va a realizar el análisis conectando directamente a la salida del LUNA, sin usar el *beam splitter*, la transición más larga, en este caso, de 2cm de longitud.

En este caso la respuesta en amplitud que da el LUNA es bastante asimétrica al igual que el taper. Se trata de un taper en el que la transición de mayor tamaño tiene el doble de longitud que la otra.

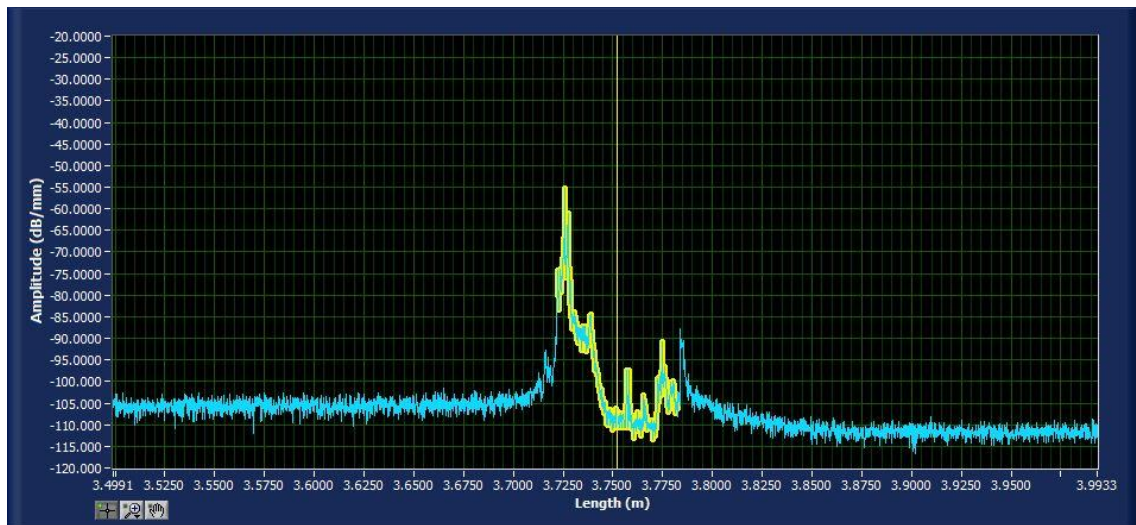


Figura 4.1.6.1-1: Respuesta en amplitud del taper número 4 con pendiente inicial de 2 cm.

En la figura 4.1.6.1-1 se puede observar la asimetría que presenta la respuesta en este caso. Se puede ver un primer pico de reflexión bastante pronunciada al comienzo del taper que es debido a la primera transición de 2 cm de longitud, y a continuación se ven pequeños picos de reflexión a medida que disminuye el valor del primero de ellos.

Esta respuesta obtenida no se asemeja a ninguna de las anteriores en ningún otro taper.

Se vuelven a observar las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial, se aprecia levemente la forma de señal con lóbulos que se esperaba medir pero está bastante distorsionada. En este caso la diferencia entre los máximos y mínimos de la señal es de aproximadamente unos 14 dB y en algunos instantes alcanza los 18 dB. Este valor es menor que los observados para los tapers anteriores, se va a estudiar si con ayuda del *beam splitter* en este caso mejora esta relación y la señal deja de estar distorsionada.

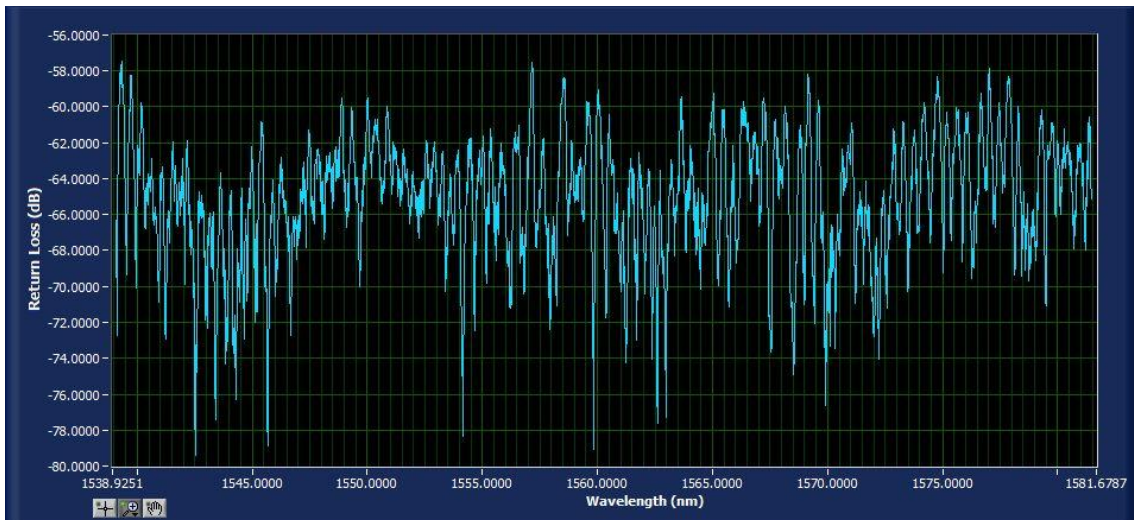


Figura 4.1.6.1-2: Pérdidas de retorno del taper número 4 con pendiente inicial de 2 cm.

Se vuelve a obtener una respuesta en amplitud compuesta por tres picos de reflexión claramente diferenciados. Nuevamente los dos situados en los extremos tienen mayor amplitud y el situado en el centro no mantiene el valor de amplitud que presentaba la respuesta del taper sin el uso del *beam splitter*. La distancia entre los picos sigue siendo la misma que en todos los casos anteriores donde se ha utilizado un *beam splitter*. Al igual que sucedía con el taper número 3 se incrementa la longitud del taper 0.5 cm y su longitud abarca de los dos picos de reflexión, en este caso se podría decir que casi los abarca por completo.

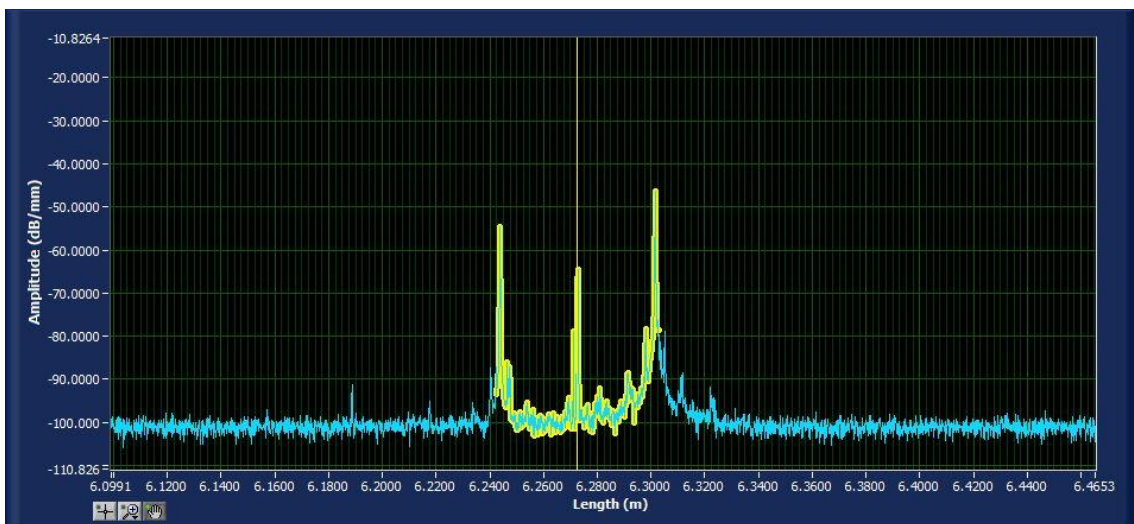


Figura 4.1.6.1-4: Respuesta en amplitud del taper número 4, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 2cm.

Como era de esperar la respuesta de las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial es diferente a las obtenidas anteriormente. En este caso no se presenta interferencia de canal como se veía en otros casos con esos lóbulos de menor tamaño que se iban alternando a lo largo de la señal, pero en la respuesta que aquí se obtiene la diferencia entre máximos y mínimos es de apenas 1.5 dB.

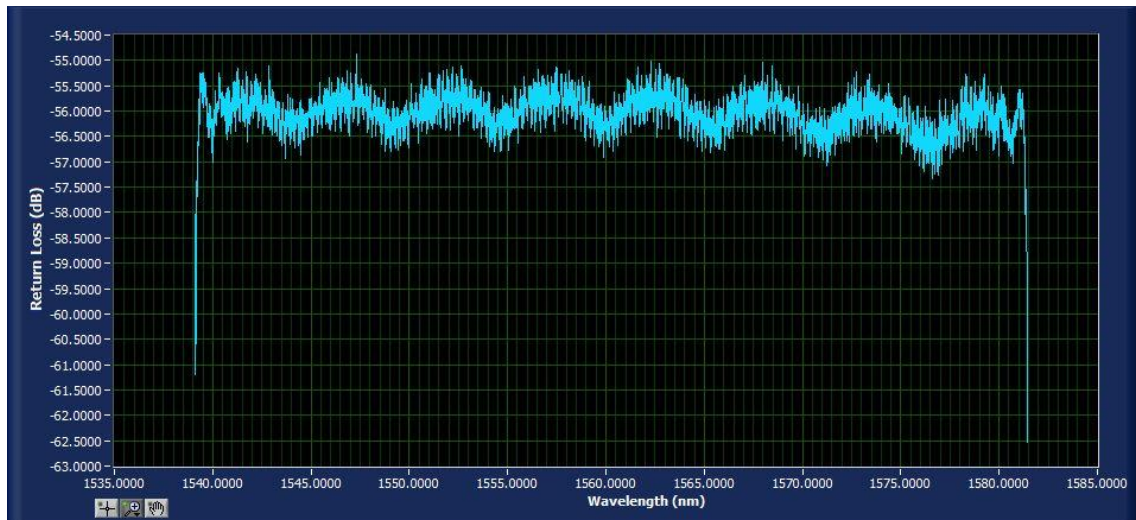


Figura 4.1.6.1-5: Pérdidas de retorno del taper número 4, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 2 cm

4.1.6.2 Pendiente 2

En último lugar se va a cambiar la configuración del taper número 4 y se va a conectar directamente a la salida del LUNA, sin ayuda del *beam splitter*, el extremo del taper con la transición de tamaño 1 cm.

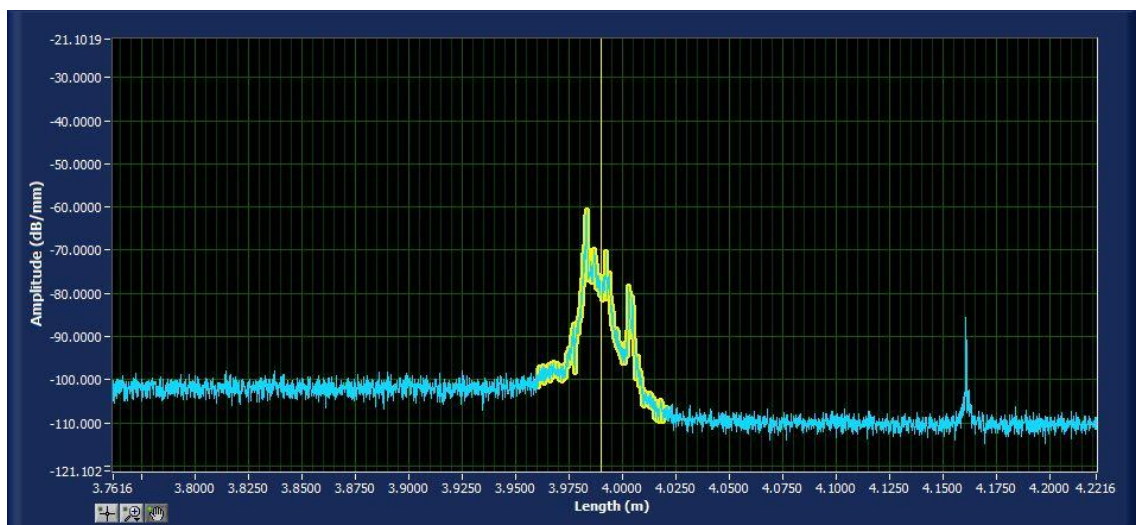


Figura 4.1.6.2-1: Respuesta en amplitud del taper número 4 con pendiente inicial de 1 cm.

Se obtiene para este caso una respuesta menos asimétrica en la que se observan dos picos de reflexión claramente diferenciados que pertenecen a las dos transiciones del taper. Justo en zona central de la longitud del taper se puede apreciar otro pequeño pico debido a la cintura del taper.



El espectro que se obtiene en este caso tiene la forma de la señal más distorsionada que en el caso anterior, se podría decir que la diferencia entre sus máximos y sus mínimos para este caso es de aproximadamente 14 dB al igual que para la otra configuración del taper número 4.

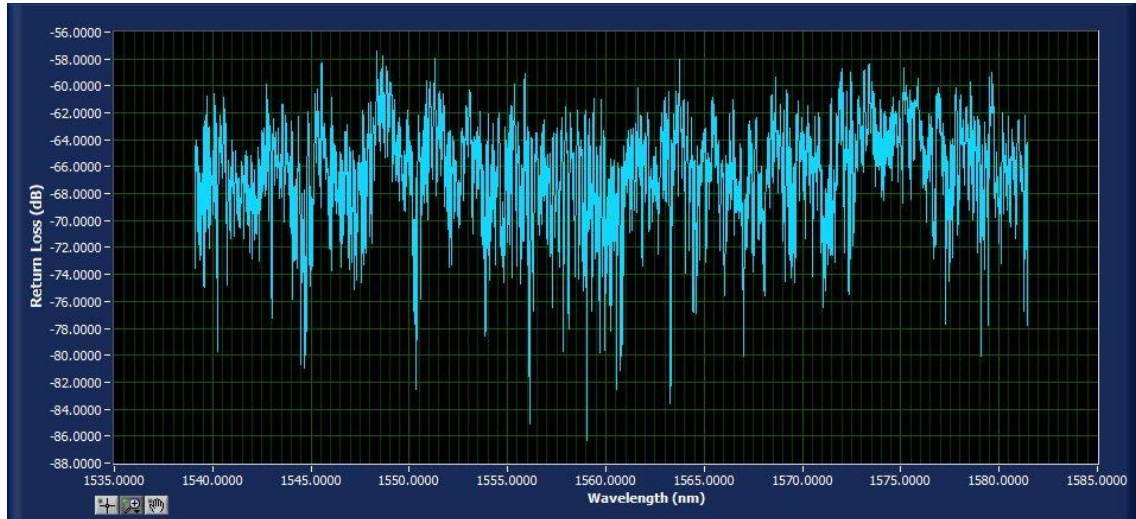


Figura 4.1.6.2-2: Pérdidas de retorno del taper número 4 con pendiente inicial de 1 cm.

Para finalizar con el estudio se vuelve a utilizar el *beam splitter* para comprobar si se va a mejorar el espectro generado por el taper o se va a obtener una respuesta frecuencial parecida a la obtenida para la anterior configuración del taper.

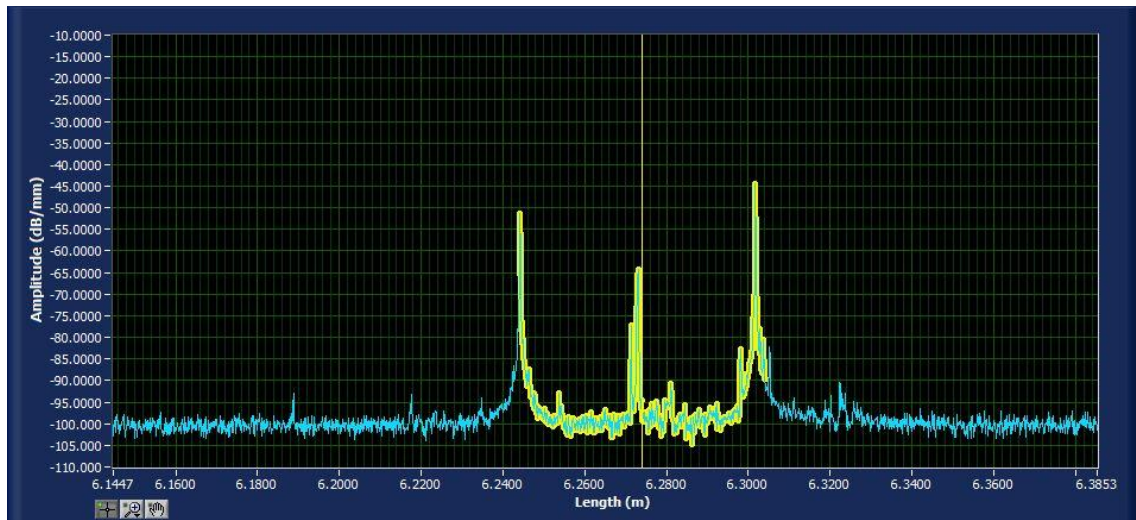


Figura 4.1.6.2-3: Respuesta en amplitud del taper número 4, tras el beam splitter, con pendiente inicial de 1cm.

Se vuelve a obtener una vez más una respuesta en amplitud compuesta por tres picos de reflexión claramente diferenciados. Nuevamente los dos situados en los extremos tienen mayor amplitud y esta vez el situado en el centro no mantiene el valor de amplitud que presentaba la respuesta del taper sin el uso del *beam splitter*. Esta respuesta es muy similar a la que se ha obtenido para el caso anterior.

Al tratarse de una respuesta muy similar a la anterior era de esperar que las pérdidas de retorno en el dominio frecuencial fueran similares también. En la figura 4.1.6.2-4 se puede ver la respuesta, la diferencia entre sus máximos y mínimos será de aproximadamente de unos 1.4 dB.

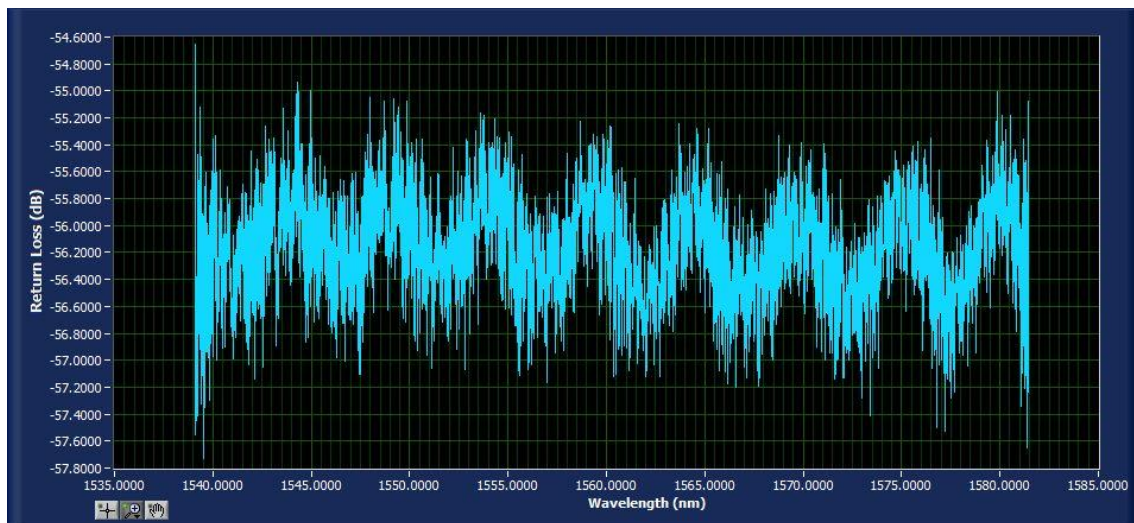


Figura 4.1.6.2-4: Pérdidas de retorno del taper número 4, tras el *beam splitter*, con pendiente inicial de 1 cm

4.1.7 Comparación de los resultados obtenidos

Se va a realizar, con ayuda de una tabla, una comparativa de los resultados que se han ido obteniendo en este estudio experimental.

Se pretende comparar las diferencias entre máximos y mínimos obtenidas para cada respuesta frecuencial dependiendo de la longitud de las transiciones. Se ha evaluado ambas configuraciones para cada taper teniendo en cuenta de si se ha usado o no el *beam splitter*.

El taper número 1 es con el que se han obtenido mejores resultados, la configuración con transición inicial de longitud 0.5 cm ha sido con la que se ha obtenido la diferencia de mayor valor.

A continuación en la tabla 4.1.7-1 se muestran todos los valores que se han obtenido a lo largo de la realización de este estudio.



	Transición Inicial	Diferencia entre sus máximos y mínimos	
		Sin <i>Beam Splitter</i>	Con <i>Beam Splitter</i>
Taper Numero1	0.5 cm	20 dB	30 dB- 37.5 dB
	1 cm	10 dB	24 dB-32 dB
Taper Numero2	1 cm	10 dB	20 dB
Taper Numero3	1.5 cm	2.2 dB	20 dB
	1 cm	6 dB	20 dB
Taper Numero4	2 cm	14 dB	1.5 dB
	1 cm	14 dB	1.4 dB

Tabla 4.1.7-1: Comparativa de los resultados que se han ido obteniendo a lo largo del estudio

Conforme se va aumentando la longitud de la transición inicial y se mantiene el 1 cm de longitud de la segunda transición se puede apreciar que, con la ayuda del *beam splitter*, la diferencia entre los máximos y los mínimos de la respuesta frecuencial va disminuyendo.

Cando se mantiene la transición de 1 cm como transición inicial y se va aumentando la longitud de la segunda transición se puede apreciar que la diferencia ya mencionada sigue disminuyendo conforme se aumenta la longitud. Esto demuestra la importancia de la pendiente de las transiciones en los tapers a la hora de utilizarlos como sensores.



4.2 Estudio experimental del uso de tapers como sensores de diferentes parámetros.

Una vez acabado el estudio anterior y tras determinar cuáles de los cuatro tapers realizados tiene mejor respuesta, esto es, una mayor sensibilidad, se realiza una comprobación de las conclusiones a las que se han podido llegar. Para ello se va a estudiar el comportamiento del taper nº1, en ambas direcciones para observar el efecto de las distintas pendientes, y del taper nº2 bajo diferentes variaciones de parámetros como la temperatura, la presencia de humedad o las vibraciones.

Para su consecución será el uso de un interrogador de sensores. Este dispositivo genera una señal óptica que se guía por la fibra. Cuando una magnitud física, como la presión, temperatura, flujo, etc. se aplica al sensor, los parámetros fundamentales de la luz, tales como la intensidad o longitud de onda, cambian. La luz retorna modificada a través de la fibra hasta el interrogador, donde se mide cuidadosamente para determinar la cantidad de cambio en la señal de luz. Se utilizan algoritmos para convertir la señal óptica en una señal electrónica calibrada que puede estar conectada a un sistema de control de procesos, a un sistema de adquisición de datos, o para una visualización en tiempo real [67].

En este caso interesa utilizar dos canales del interrogador, uno de salida y otro de entrada. Para ello haremos uso de un circulador óptico. Los circuladores óptico son dispositivos que transmiten la luz de un puerto a otro en una única dirección. Estos dispositivos resultan de gran importancia en los sistemas de comunicaciones ópticos para evitar que las reflexiones de las señales alcancen a otros dispositivos y puedan dañarlos, como por ejemplo a los láseres, ofreciendo unas altas pérdidas de retorno. En este caso va a servir para que la señal de luz emitida por el primer canal tras verse afectada por la respuesta del taper no retorne y actúe únicamente como canal de salida, y por el contrario el canal dos sea solo canal de entrada.

Por lo tanto, la configuración óptima que se va a utilizar para medir la respuesta del taper [68,74] y poder determinar la sensibilidad de este respecto a distintos factores ha sido la que se muestra en la figura 4.2-1.

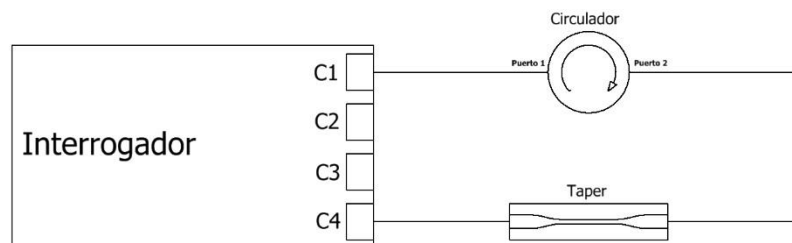


Figura 4.2-1: Configuración utilizada para realizar medidas con el taper.



4.2.1 Taper Numero 1

4.2.1.1 Pendiente 1

Se va a comenzar con el taper número 1 que como ya se ha explicado anteriormente se trata de un taper asimétrico de 4.5 cm de longitud con transición inicial de 0.5cm y otra transición de 1cm.

Con el software del interrogador se puede visualizar la respuesta frecuencial del taper en tercera ventana, es decir desde 1500 hasta 1600 nm, y observar los niveles de potencial alcanzados por ésta. El espectro frecuencial obtenido en este caso se podría decir que es el esperado teniendo en cuenta la respuesta que se consiguió al realizar las medidas con el LUNA. Obviamente hay que tener en cuenta la altísima resolución que éste tenía y que por lo tanto la respuesta no será igual. Para las medidas que se quieren realizar en este caso con este interrogador será más que suficiente.

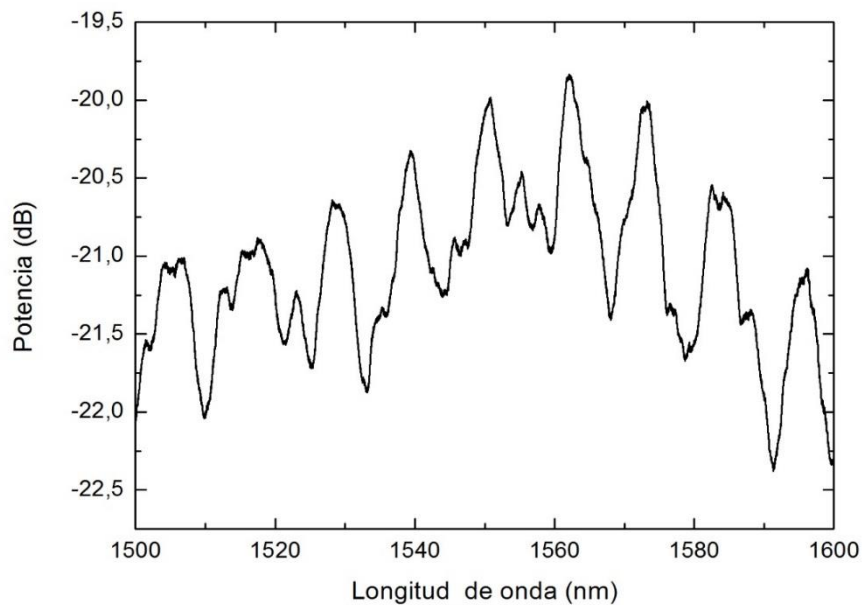


Figura 4.2.1.1-1: Espectro taper número 1, pendiente 1.

Con ayuda de Matlab se ha realizado todo el tratado y procesado de datos, ya que el software del interrogador únicamente da la posibilidad de extraer el espectro.

Para poder determinar la sensibilidad del taper fue necesario realizar la transformada de Fourier, FFT, y observar las diferentes componentes frecuenciales del taper, el espectro, y fue necesario además determinar cuál o cuáles de ellos eran sensibles a los diferentes parámetros a evaluar.

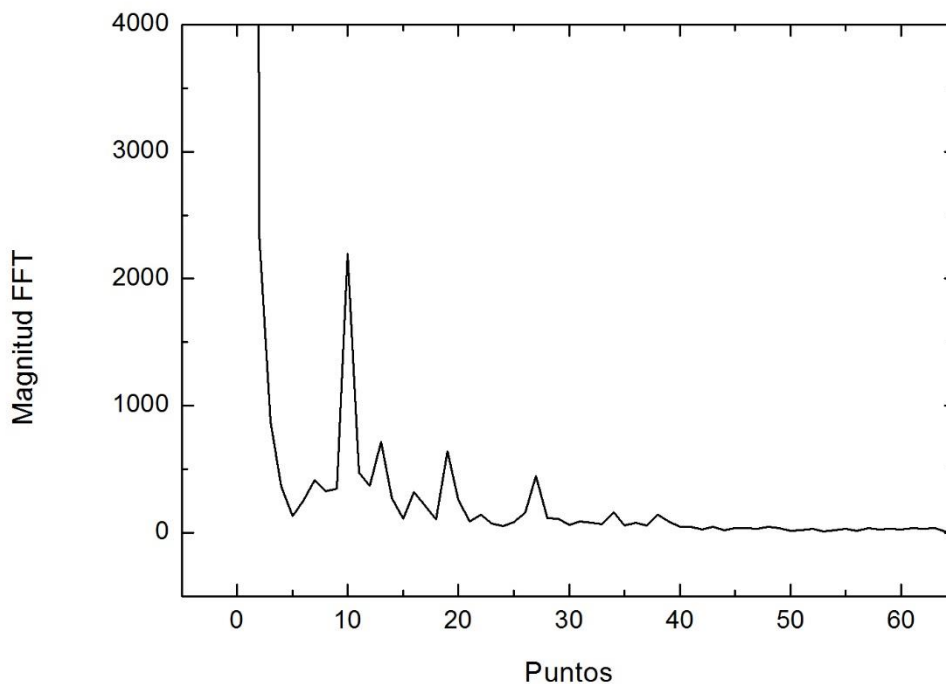


Figura 4.2.1.1- 2: Transformada de Fourier del taper 1, pendiente1.

Como se puede ver en la figura 4.2.1.1-2 en la que se muestra como la FFT presenta una serie de picos con diferentes niveles de potencia. En primer lugar, se tiene un primer pico con un nivel de potencia superior al de los demás que aparentemente podría ser el más indicado para medir los distintos parámetros, pero eso no tiene por qué ser así. En función del parámetro que se desee medir existirán unos picos más sensibles que otros, por lo que será necesario realizar una serie de test preliminares. Además, cabe destacar que en la mayoría de los casos la sensibilidad medida en los armónicos de segundo o tercer orden es mayor que aquella medida en la frecuencia fundamental, independientemente del nivel de potencia asociado a cada frecuencia.

4.2.1.1.1 Medidas de Temperatura

Vamos a comenzar estudiando la respuesta que tiene el taper como sensor de temperatura. Para ello se va a utilizar una cámara climática para realizar barridos de temperatura con diferentes finalidades, principalmente para evaluar la respuesta de sensores de fibra óptica. En este caso se ha decidido realizar un barrido de temperatura desde los 30°C hasta los 80°C con intervalos de 5°C. Se va a ir aumentando progresivamente la temperatura, una vez se alcance el valor deseado se va a esperar unos minutos antes de incrementar en 5°C la temperatura ya que además de que la cámara climática sufre histéresis se necesita algo de tiempo hasta que el taper alcance la temperatura de la cámara climática.

Para determinar la sensibilidad que tiene el taper respecto a la temperatura hay que analizar el comportamiento que tiene la fase de uno de las componentes frecuenciales de la FFT



a seguir. Conforme se aumenta la temperatura esta fase deberá ir aumentando o disminuyendo, dependiendo de cómo sea la variación en fase. Con ello se podrá determinar la sensibilidad que es el taper y sus posibles aplicaciones.

Una vez realizado el barrido de temperatura se han estudiado las diferentes componentes frecuenciales de la FFT y se ha llegado a la conclusión de que todas ellas son, en mayor o menor medida, sensibles. Se ha visto, además, que para medir parámetros como la temperatura la componente frecuencial localizada en el punto número 26, correspondiente al segundo armónico de la componente frecuencial situada en el punto número 13, es el más sensible y tiene mejor respuesta a la temperatura.

En la figura 4.2.1.1.1-1 se muestra la variación de la fase de dicha componente frecuencial respecto de la temperatura.

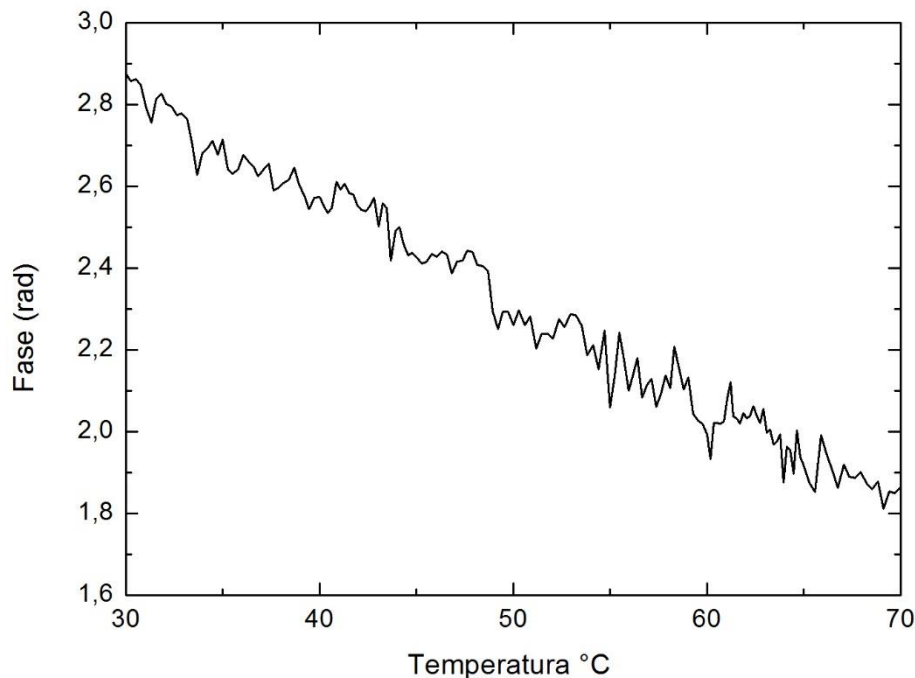


Figura 4.2.1.1.1-1: Variación de fase respecto a la temperatura (30°C-70°C)

A pesar de haber realizado el barrido hasta 80°C, en la figura se muestra únicamente hasta 70°C ya que a partir de esa temperatura la fase se mantenía constante y no se apreciaba variación alguna. , Salvo que ser tratase de un error en la ejecución de las medidas, cosa que se descartó tras repetir este proceso, este hecho nos indicaría que este taper sería válido como sensor dentro del rango desde 30°C a 70°C . La forma que se aprecia en la figura se debe a la histeresis ya mencionada de la cámara climática, conforme aumentamos la temperatura en pasos de 5°C el taper en un primer instante responde de manera rápida pero luego la fase se estabiliza. Otro factor a tener en cuenta es que la sensibilidad del taper puede verse afectada también por las vibraciones que produce el ventilador interno de dicha cámara.



Para apreciar mejor la respuesta obtenida se normalizan estos valores y se muestran en la figura 4.2.1.1.1-2 junto con la ecuación de tendencia que sigue la recta que une los puntos en cada intervalo de medida. Es necesario realizar la recta de tendencia para determinar la pendiente de la misma, esta pendiente nos va a marcar la sensibilidad. Cuanto mayor es la pendiente más sensibilidad tendrá el sensor, o lo que es lo mismo, más fácilmente va a ser posible discernir entre dos puntos contiguos y por lo tanto se va a poder determinar con mayor detalle la temperatura a la que se encuentra.

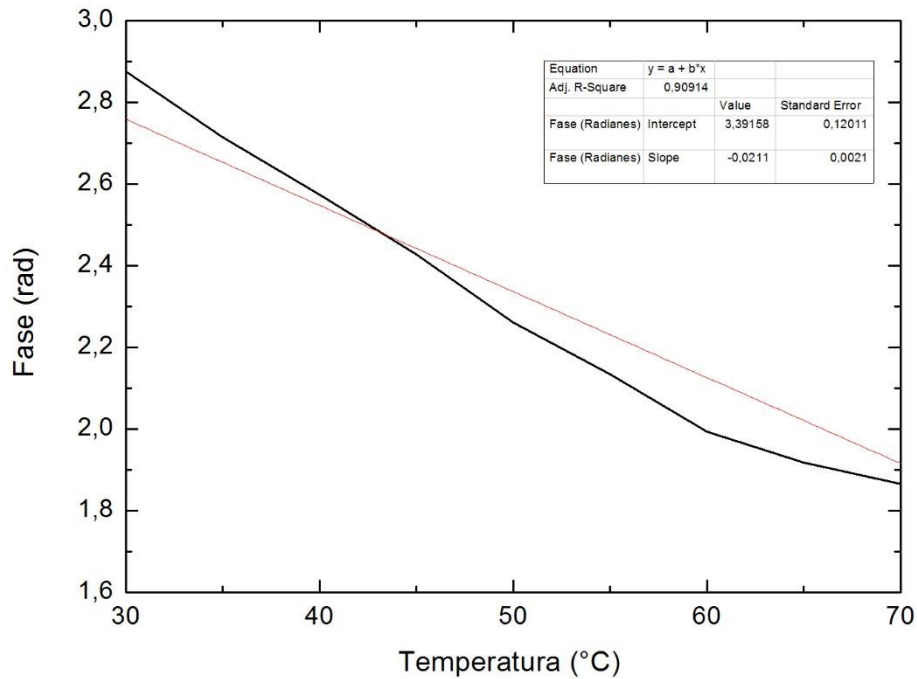


Figura 4.2.1.1.1-2: Variación de fase normalizada.

Como se puede ver el comportamiento de la fase no sigue perfectamente la línea de tendencia dibujada en color rojo, probablemente debido a los factores previamente comentados. Esta pendiente es de $-0.0211\text{rad}/^\circ\text{C}$.

Esta variación de fase en la FFT nos da una idea acerca de cómo varía, o se desplaza, la longitud de onda por el cambio de temperatura aplicado, por lo que se comprueba que la variación de fase que se obtiene en la FFT es lo suficientemente significativa como para apreciar el efecto de ésta en el espectro.

En otros estudios que se han realizado en los que se medía la sensibilidad de los tapers frente a variaciones de temperatura se han obtenido resultados similares en los que la variación de fase conforme aumentaba la temperatura era negativa [7].

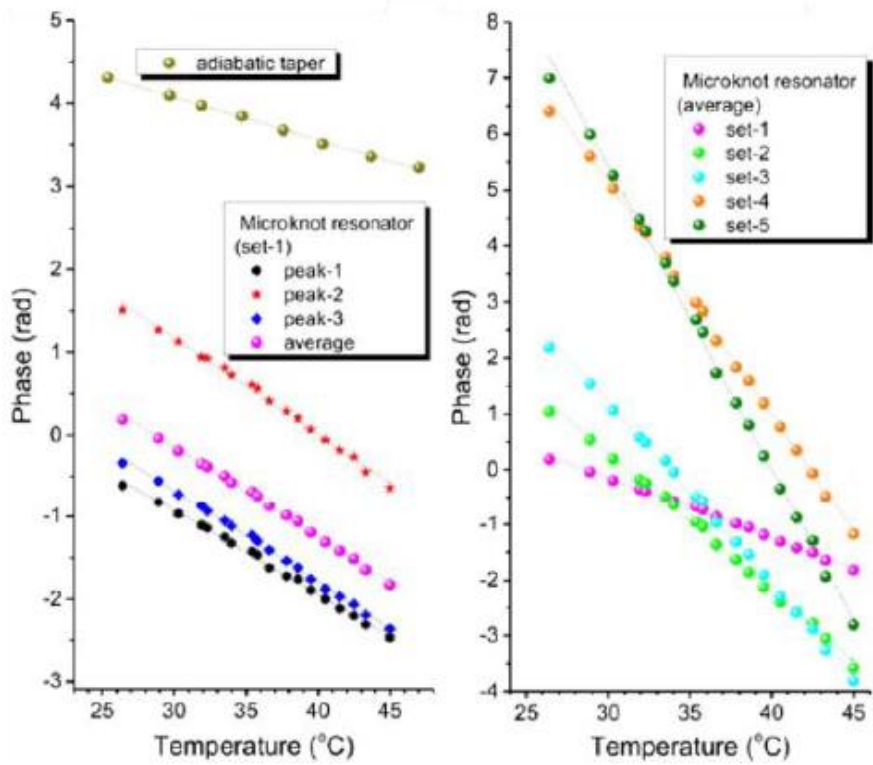


Figura 4.2.1.1.1-3: Resultados obtenidos de medidas de temperatura para tapers con distintas configuraciones [7].

A continuación, se muestra, en la figura 4.2.1.1.1-4, el espectro de la señal al inicio del barrido cuando el taper se encontraba a 30°C y el espectro al finalizar a 70°C. Se puede apreciar cómo este espectro, además de estar desplazado en longitud de onda, el nivel de potencia ha variado.

Que el nivel de potencia del espectro disminuya se debe a que al aplicar temperatura sobre el taper la FFT no sólo cambia en fase, sino que también lo hace en módulo. Las componentes frecuenciales que se han estado observado para este estudio están variando al aplicar calor, no solo su fase, sino que también la potencia de éstas disminuye.

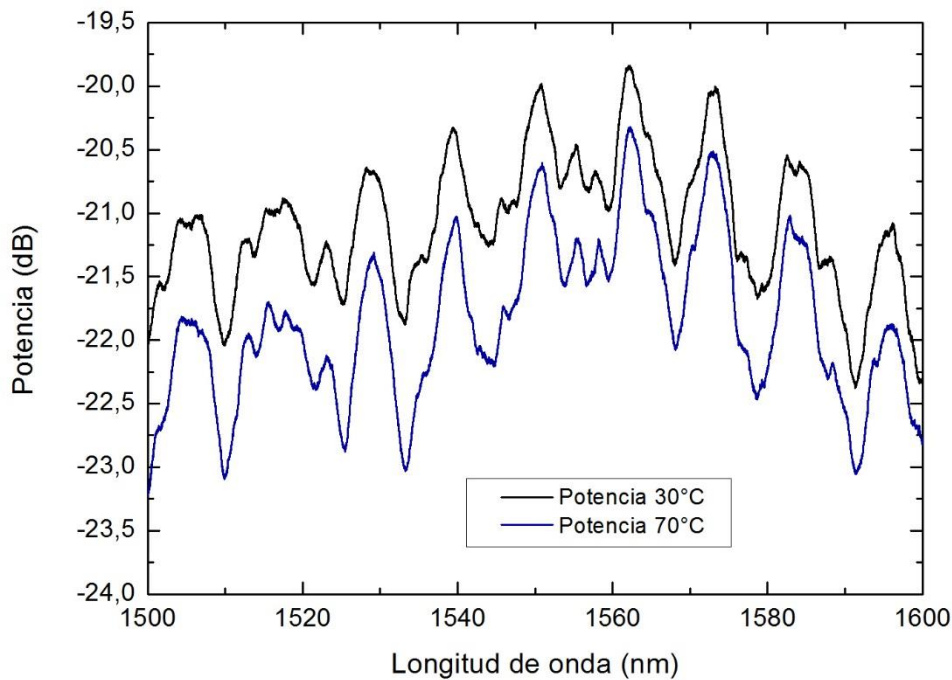


Figura 4.2.1.1.1-4: Comparación de espectros obtenidos a 30°C y 70°C

4.2.1.2 Pendiente 2

Se continuará con el estudio del taper número 1 pero este caso se analizará desde el otro extremo, invirtiendo el taper. Con esto se quiere comprobar el efecto que puede llegar a tener la pendiente de la transición inicial a la hora de utilizar los tapers como sensores, en este caso de temperatura.

En la figura 4.2.1.2-1 se muestra el espectro obtenido con la nueva configuración. Se puede apreciar que el nivel de potencia en este caso es menor que en el anterior, lo que quiere decir que presenta mayores pérdidas, aunque esta diferencia sea de tan sólo 1.5 dB menos de potencia. Lo que resulta de mayor interés es que la diferencia existente entre los máximos y los mínimos de la señal es mayor que en el caso anterior y como ya se mencionó en el estudio realizado con el LUNA, cuanto mayor es esta diferencia entre máximos y mínimos, mayor sensibilidad que ofrezca el sensor.

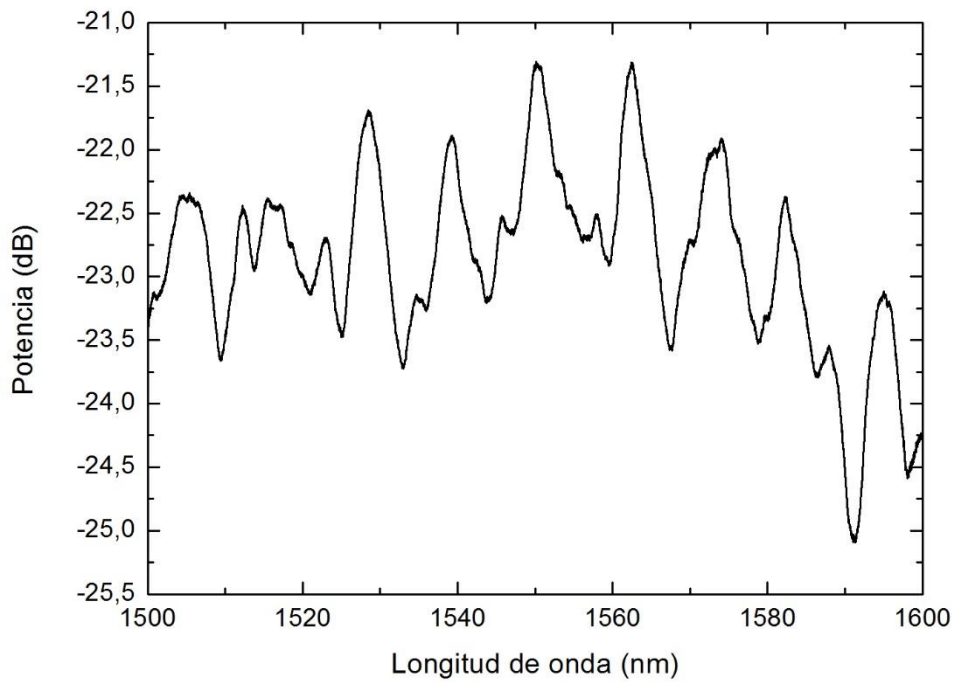


Figura 4.2.1.2-1: Espectro del taper número 1, pendiente 2.

Al igual que se hizo en el caso anterior se realizó la transformada de Fourier para poder analizar las distintas componentes frecuenciales que forman el espectro y determinar la sensibilidad asociada a cada una de ellas.

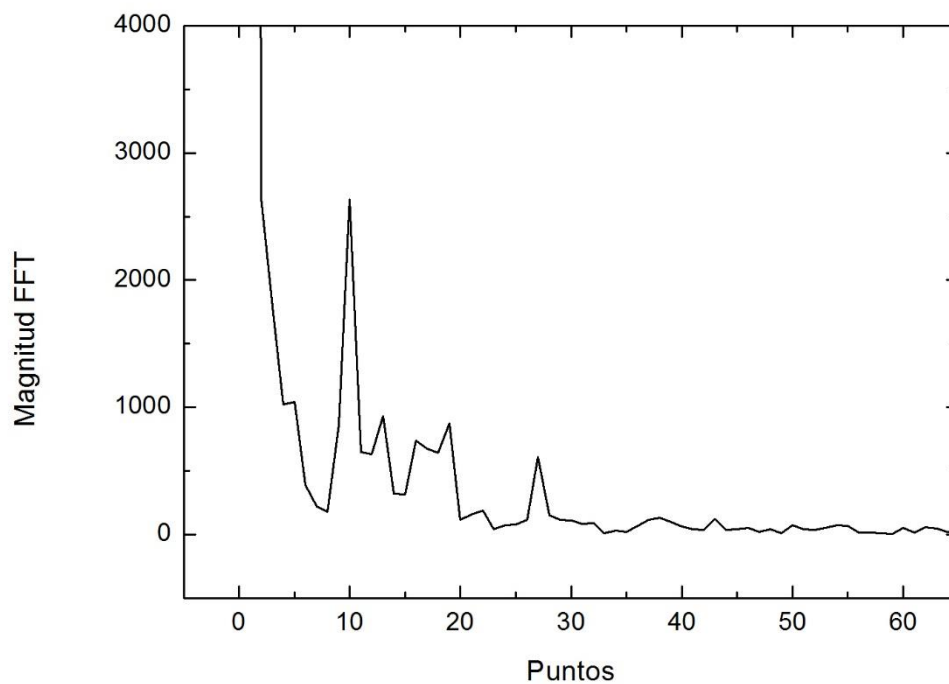


Figura 4.2.1.2-2: FFT del taper numetro1, pendiente 2.



Como se puede apreciar la FFT generada presenta varias diferencias respecto al caso anterior. En esta ocasión algunas de las componentes se solapan parcialmente entre ellas dando la sensación de que podrían llegar a ser una única componente. A la hora de realizar nuestro estudio no va a importar este fenómeno ya que se va a realizar el seguimiento del punto número 26, pico que se encuentra bien aislado sin ningún otro que le pueda interferir. Además, el objetivo de este estudio es hacer una comparativa entre resultados obtenidos con diferentes pendientes en la primera transición en las mismas condiciones y ese punto es el que se ha observado en el caso anterior.

4.2.1.2.1 Medidas de Temperatura

Al igual que en el caso anterior se va a realizar un barrido de temperatura con la cámara climática desde los 30°C hasta los 80°C con intervalos de 5°C similar al realizado anteriormente.

Tras realizar una vez más el seguimiento de la fase en la componente espectral establecida se obtiene la figura 4.2.1.2.1-1 mostrada a continuación.

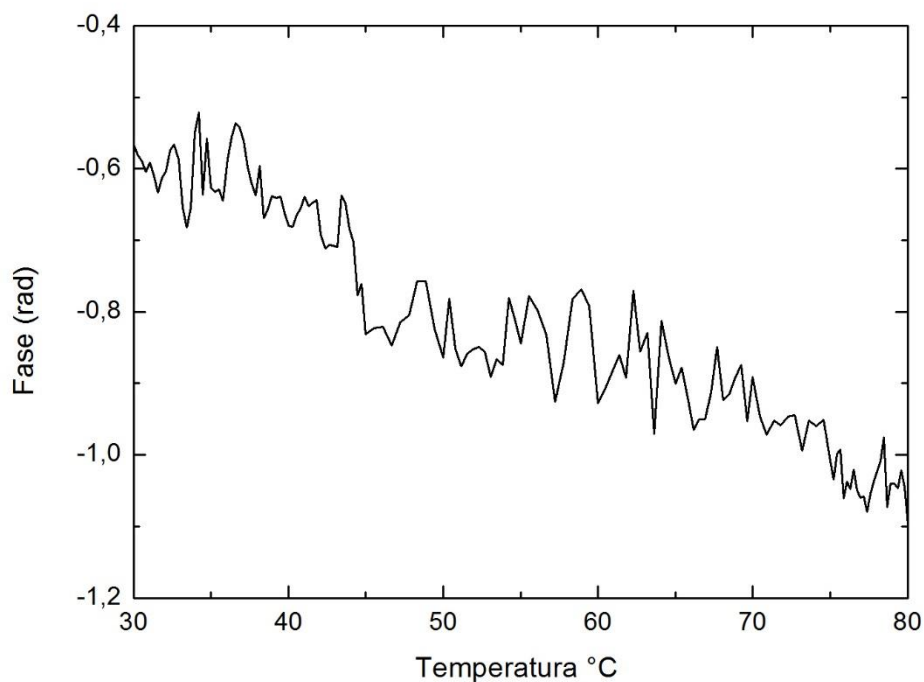


Figura 4.2.1.2.1-1: Variación de fase respecto a la temperatura (30°C-70°C)

De nuevo se analiza el comportamiento de la fase para un barrido de temperatura desde 30 a 80°C. Como ya se ha mencionado antes las irregularidades que se aprecian en la respuesta de la fase pueden verse originadas por las vibraciones producidas por el ventilador de la cámara climática y a la histéresis que este tiene.

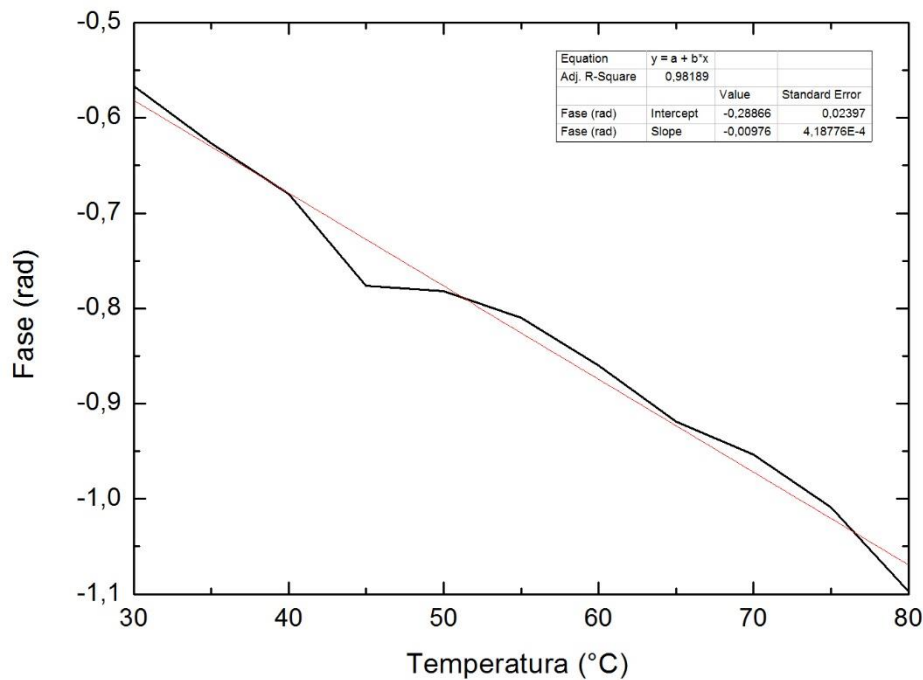


Figura 4.2.1.2.1-2: Variación de fase normalizada.

Al normalizar la variación de la fase obtenida al incrementar la temperatura en la figura 4.2.1.2.1-2 se puede apreciar que en este caso tiene una tendencia mucho más lineal. Al calcular la línea de tendencia de la respuesta de la fase se ve como en este caso la aproximación lineal se ajusta mucho más a la ecuación de una recta.

La pendiente calculada para este caso es de $-0.00976 \text{ rad/}^\circ\text{C}$ peor resultado que el obtenido en el anterior caso, que era de $-0.0211 \text{ rad/}^\circ\text{C}$.

Por lo tanto, se podría decir que, aunque abarque un mayor rango de temperatura para el cual es sensible de 70 a 80°C , tiene una peor respuesta a las variaciones de temperatura, teniendo menor sensibilidad. Esta configuración ofrece peores prestaciones a la hora de medir temperatura con mayor resolución.

Al igual que en el caso anterior se puede ver cómo afecta la variación de temperatura en el espectro. En la figura 4.2.1.2.1-3 se muestran el espectro en el instante inicial a 30°C y el espectro cuando el taper se encuentra a 80°C . Nuevamente el espectro se desplaza en longitud de onda, pero cabe destacar que en este caso no se ve la variación tan significativa en los niveles de potencia como los que presentaba el taper al medirlo por el otro extremo. Esto quiere decir que al aplicar calor al taper las componentes de la FFT se van a ver modificadas en fase, pero no tanto en magnitud. Esto va a ser ventajoso para la utilización del taper como sensor en diferentes aplicaciones.

Una vez que se decidió que la anterior configuración presenta diversas ventajas a la hora de utilizar el taper como sensor, será con ella con la que serán realizadas las medidas siguientes.

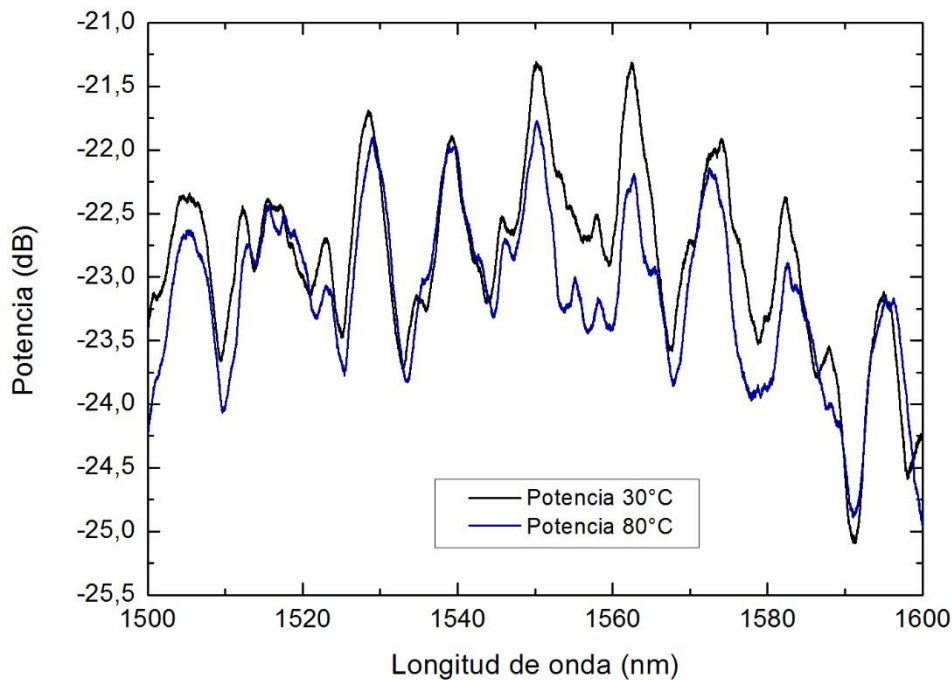


Figura 4.2.1.2.1-3: Comparación de espectros obtenidos a 30°C y 80°C

4.2.1.3 Otras medidas realizadas

4.2.1.3.1 Medidas con humedad (vaho)

Otro parámetro interesante a medir es la presencia de humedad o la cuantificación de ésta del ambiente, sin embargo, y dada su dificultad para realizar estudios de este parámetro físico, en este caso se va a realizar mediciones con aplicaciones de vaho directamente sobre la fibra estrechada. Se va a determinar cómo afecta la aplicación de este elemento sobre el taper y comprobar así la viabilidad de estas fibras estrechadas como sensores de humedad.

Para esto lo que se ha hecho es aplicar aleatoriamente vaho, simulando la respiración de un ser humano, sobre el taper a lo largo de un tiempo. Para ello se ha utilizado, una vez más la FFT de la señal obtenida ha seguido la variación de fase de una de sus componentes frecuenciales. de sus picos.

En esta ocasión se ha optado por seguir la muestra de la FFT situada en el punto número 10, ya que su componente espectral es el de mayor nivel de potencia. Tras estudiar la respuesta que se obtenía al aplicar vaho en múltiples de estas componentes espectrales, se ha llegado a la conclusión que este era el más apropiado para este caso. Al fin y al cabo, se le está aplicando vaho en un instante y, debido a las altas pérdidas que poseen estas fibras estrechadas, será de esperar que todas las componentes espectrales sean sensibles a este parámetro.



En la figura 4.2.1.3.1-1 se muestra la variación de fase que se produce en la componente espectral seleccionada al aplicar vaho sobre el taper durante unos breves instantes tiempo. Se han llevado a cabo medidas durante 100 segundos en los cuales se ha aplicado vaho, simulando la respiración, en tres ocasiones.

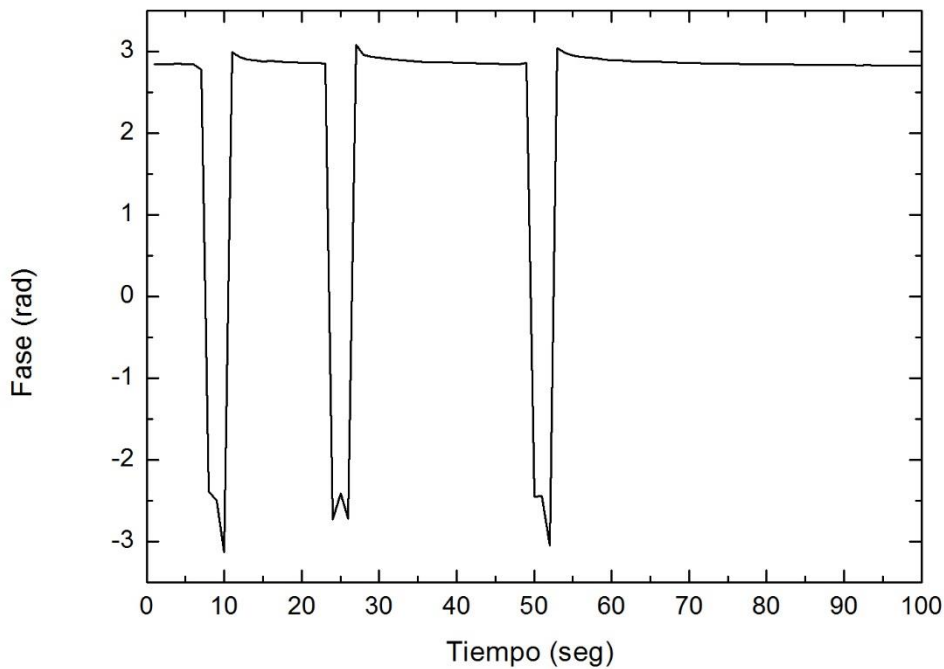


Figura 4.2.1.3.1-1: Variación de fase con aplicaciones de humedad.

Como se puede ver en la figura anterior, a los 10 segundos de comenzar la medida se ha aplicado vaho por primera vez, lo que ha generado una inversión de fase de π radianes a $-\pi$ radianes, casi por completo en el periodo que dura la aplicación, por lo tanto, se puede afirmar que el taper es altamente sensible a este parámetro.

Otro aspecto a tener en cuenta es la rapidez con la que el sensor recupera el estado inicial en el que se encontraba su fase. Por este motivo se optó por monitorizar la componente espectral centrada en la muestra número 10. Se podría decir que los primeros armónicos a pesar de tener un mayor nivel de potencia, pero una menor sensibilidad que el segundo y tercer armónico, poseen una capacidad de recuperación del estado inicial más rápida cuando se modifica la humedad a las que están expuestos.

La figura 4.2.1.3.1-2 muestra una comparación del espectro inicial de la señal con el espectro resultante a los 10 segundos, momento en el cual se aplica el vaho sobre la fibra estrechada. Se aprecia una ligera disminución del nivel de potencia en algunas longitudes de onda, pero al contrario que lo visto anteriormente no se aprecia apenas desplazamiento del espectro.

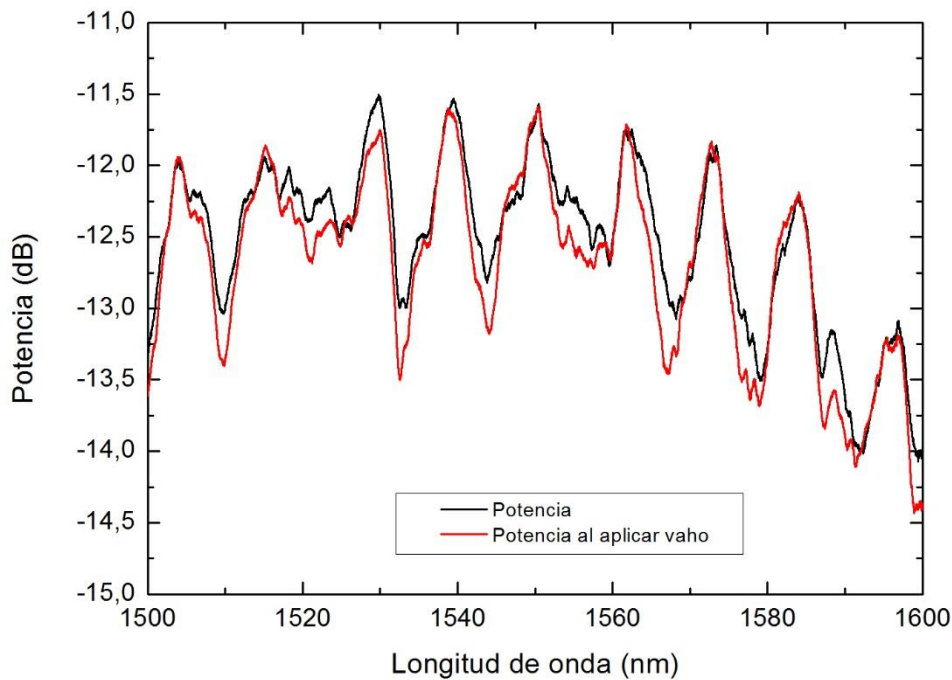


Figura 4.2.1.3.1-2: Comparación de espectros.

4.2.1.3.2 Medidas con vibraciones

Por último, se van a realizar medidas para determinar si el taper es capaz de detectar vibraciones. Se estima que estas fibras estrechadas serán capaces de detectar variaciones de este parámetro ya que en las medidas previas de temperatura la respuesta del taper se veía afectada por las vibraciones que generaba el ventilador de la cámara climática. Lo que interesa comprobar es hasta qué punto es capaz de detectarlas y si podría ser utilizado para diferentes aplicaciones como sensor de vibración.

Para este estudio lo que se ha realizado ha sido un seguimiento, al igual que con las medidas de vaho, del punto centrado en 10. Durante un periodo de 200 segundos se han realizado pequeños golpes sobre la superficie en la cual se encontraba apoyado el taper y se han analizado las variaciones de fase que se producían en ese intervalo de tiempo.

Estas variaciones se muestran representadas en la figura 4.2.1.3.2-1. Dependiendo de la fuerza del impacto sobre la superficie se apreciará más o menos variación de fase, aun así, las variaciones de fase que se observan no son muy significativas, tienen valores muy pequeños y sería complicado una implementación física de un sensor de vibración con este taper. Para poder decir que se podría utilizar los tapers como sensores de vibración se necesitarían equipos de medida con una mayor precisión.

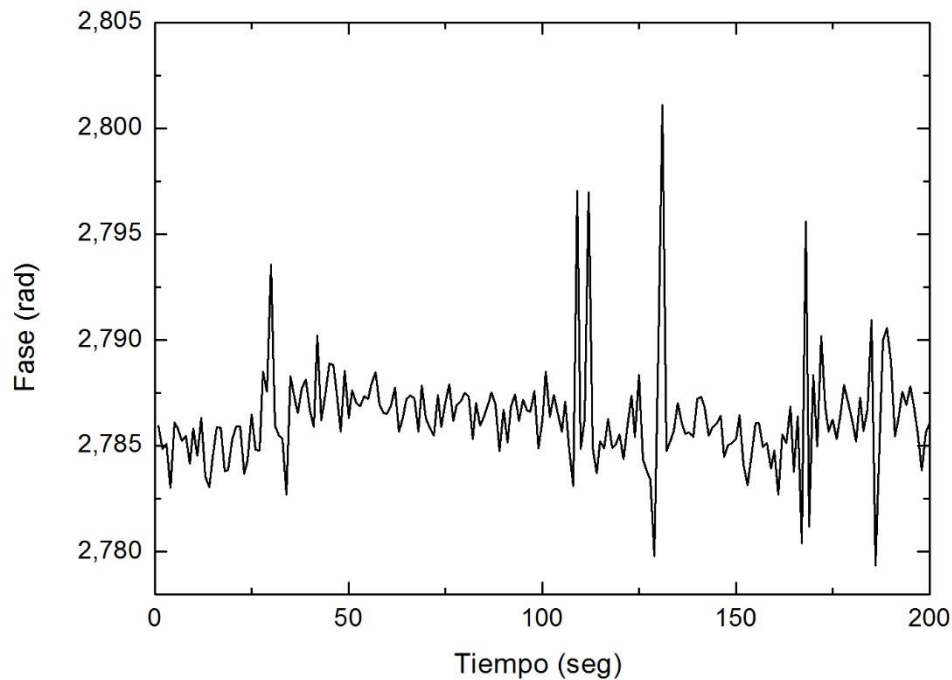


Figura 4.2.1.3.2-1: Variación de fase con vibraciones.

4.2.2 Taper Numero 2

4.2.2.1 Pendiente 1

El procedimiento de medida del taper número 2 será similar al explicado anteriormente para el caso de un taper simétrico de 5 cm de longitud con dos transiciones iguales de 1cm cada una.

Al tratarse de un taper simétrico solo se va a realizar medidas con una única configuración, no será necesario cambiar los extremos del taper ya que al ser simétrico se va a obtener la misma respuesta, aunque se le cambie de sentido.

En la figura 4.2.2.1-1 se muestra el espectro de la señal recibida en el interrogador, aparentemente es bastante similar a la que se obtenía para los casos anteriores. Como diferencia se podría decir que en este caso el nivel de potencia es aproximadamente 8dB inferior a las anteriores, esto se traduce en que el taper tiene mayores pérdidas.

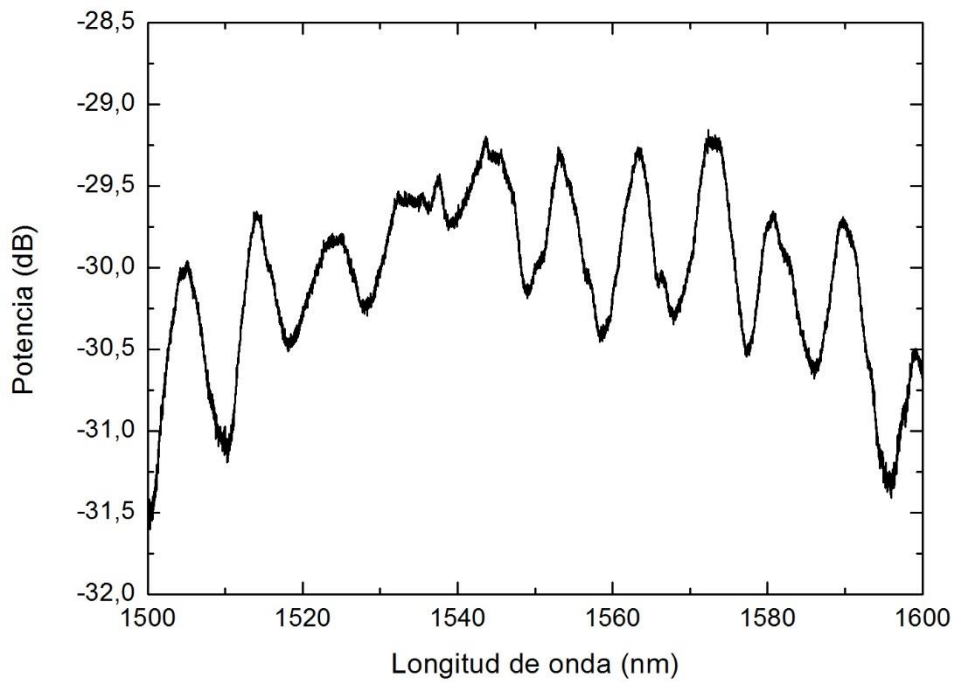


Figura 4.2.2.1-1: Espectro del taper número 2.

Nuevamente se vuelve a realizar la transformada de Fourier que se muestra en la figura. Para este caso vemos que la respuesta del taper tiene dos tonos claramente diferenciados por su nivel de amplitud pero que están prácticamente solapados. Al contrario que con el taper número 1 no se observan armónicos, únicamente ruido, por lo tanto, optaremos por uno de estas dos componentes frecuenciales que se aprecian en la FFT.

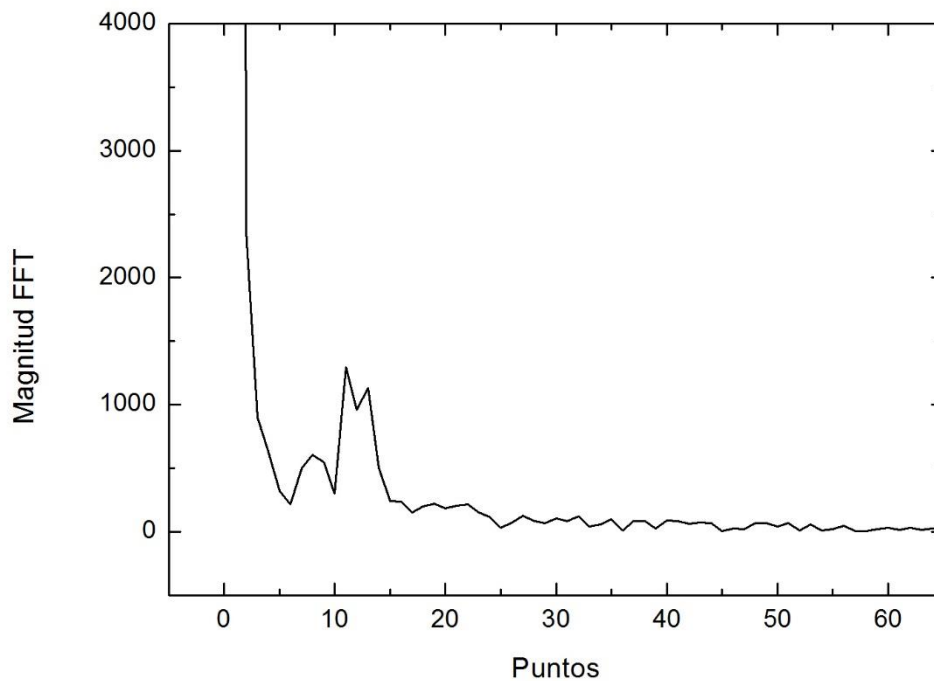


Figura 4.2.2.1-2: FFT taper número 2.



El hecho de que no aparezcan en la FFT los armónicos que se observaban en los casos anteriores se debe a que, al igual que los primeros armónicos, se encuentran muy próximos uno del otro. En este caso se suman las dos componentes por lo que es probable que los segundos y terceros armónicos se estén restando y resulten inservibles para medir las variaciones de estos parámetros.

4.2.2.1.1 Medidas con temperatura

Tras revisar el comportamiento que tienen cada una de las dos componentes frecuenciales que se acaban de mencionar se ha decidido que la componente que tiene mejor respuesta frente a la temperatura es el situado en el punto número 13.

Se ha realizado el mismo barrido de temperatura que en los casos anteriores, desde los 30°C hasta los 80°C con intervalos de 5°C. Se va a ir aumentando progresivamente la temperatura, una vez que se alcance el valor deseado se va a esperar unos minutos antes de incrementar en 5°C la temperatura ya que, como se ha mencionado anteriormente, la cámara climática sufre de histéresis y se necesita algo de tiempo hasta que el taper alcanza la temperatura de la cámara.

Una vez realizadas las medidas la variación de fase que se obtiene es la mostrada en la figura 4.2.2.1.1-1.

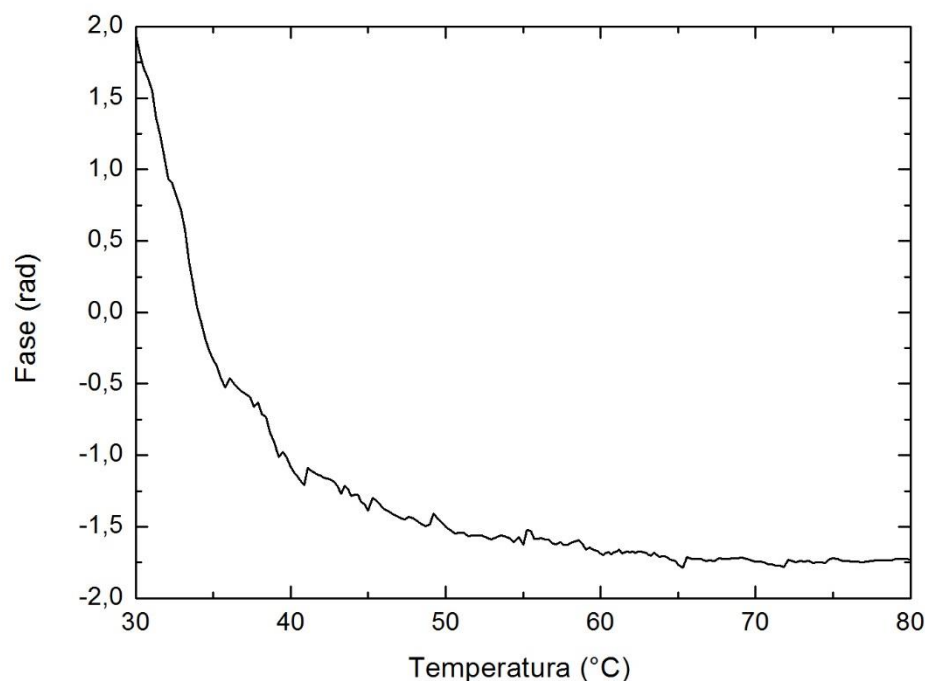


Figura 4.2.2.1.1-2: Variación de fase respecto a la temperatura (30°C-40°C)

Al igual que se ha hecho para los anteriores casos se normalizan estos valores y se muestran en la figura 4.2.2.1.1-3.

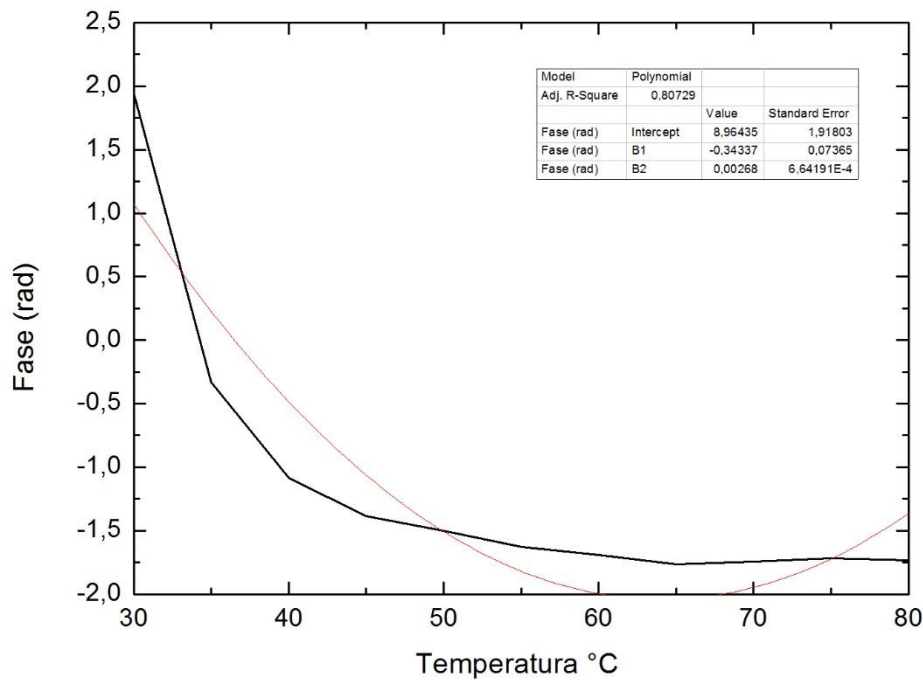


Figura 4.2.2.1.1-3: Variación de fase respecto a la temperatura normalizada

La respuesta obtenida no se asemeja a la esperada. La grafica en este caso no sigue una respuesta lineal como en los casos anteriores, tiene una tendencia exponencial. Se ha comparado el espectro obtenido en el instante inicial a 30°C de temperatura y el espectro del momento en el que el taper se encontraba a 80°C.

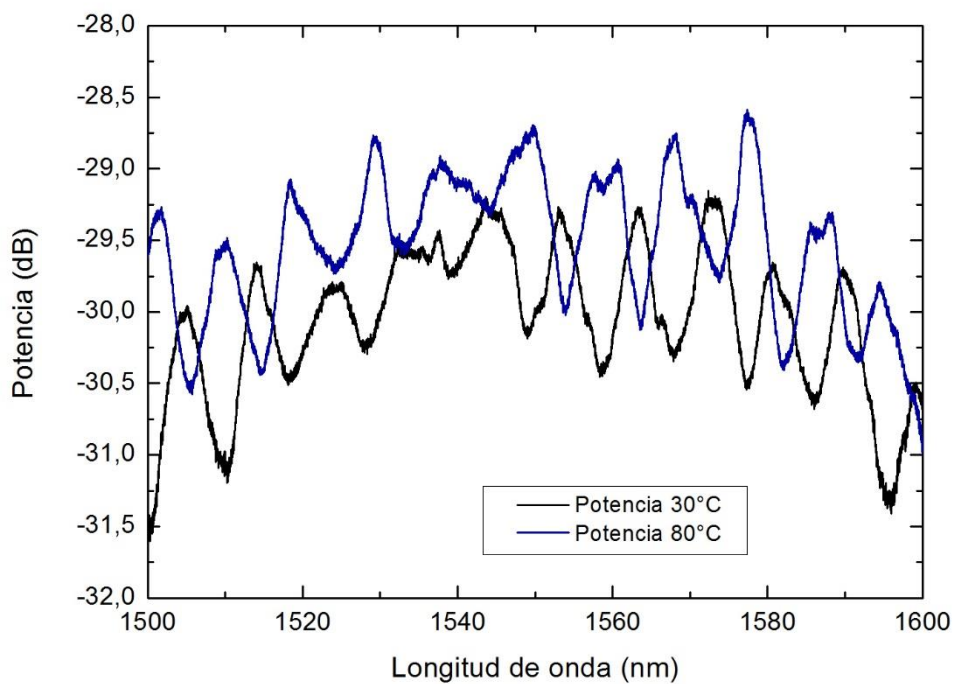


Figura 4.2.2.1.1-4: Comparación de espectros obtenidos a 30°C y 80°C



En la figura 4.2.2.1.1-4 se puede apreciar cómo además de verse la señal desplazada en longitud de onda, el nivel de potencia del espectro en el instante en el que el taper se encuentra a 80°C es mayor. Este es un resultado no esperado pero que tendrá relación con la respuesta que tiene la fase al aplicar variaciones de temperatura elevadas.

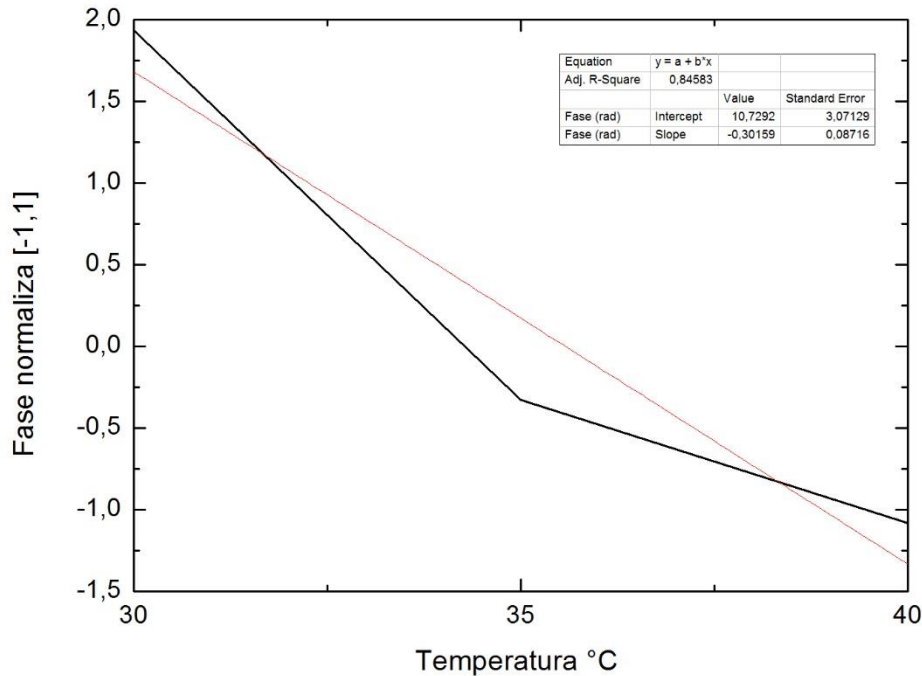


Figura 4.2.2.1.1-5: Variación de fase respecto a la temperatura (30°C-40°C)

Aquí se observa que el taper es muy sensible a temperatura ambiente, característica que no es muy interesante en los sensores ya que la respuesta se vería afectada por las condiciones meteorológicas o del entorno. La respuesta de la fase sigue la línea de tendencia dibujada en la figura 4.2.2.1.1-5 en color rojo, esta tiene una pendiente de -0.30159 rad/°C valor que, en algunos casos, podría servir para que el taper pudiese actuar como sensor

La respuesta que se ha obtenido se puede deber a que las dos componentes frecuenciales se solapan parcialmente y la fase obtenida puede ser combinación de ambas contribuciones.

4.2.2.1.2 Medidas con humedad (vaho)

Se va a proceder a medir la sensibilidad del taper frente a aplicaciones de vaho. Para estas medidas se ha decidido realizar el seguimiento de la fase respecto al tiempo de la componente frecuencial centrada en el punto 11 de la FFT. Es la componente frecuencial con mayor nivel de potencia y, tras estudiar la respuesta que se obtenía al aplicar vaho en los dos picos, se ha llegado a la conclusión de que este era el más apropiado.



A continuación, se muestra la respuesta que se ha obtenido de la fase durante un periodo de 100 segundos. Al igual que en las medidas realizadas en el taper número 1 para detectar vaho se ha ido aplicando vaho intensamente aleatoriamente durante un periodo de aproximadamente 3 segundos.

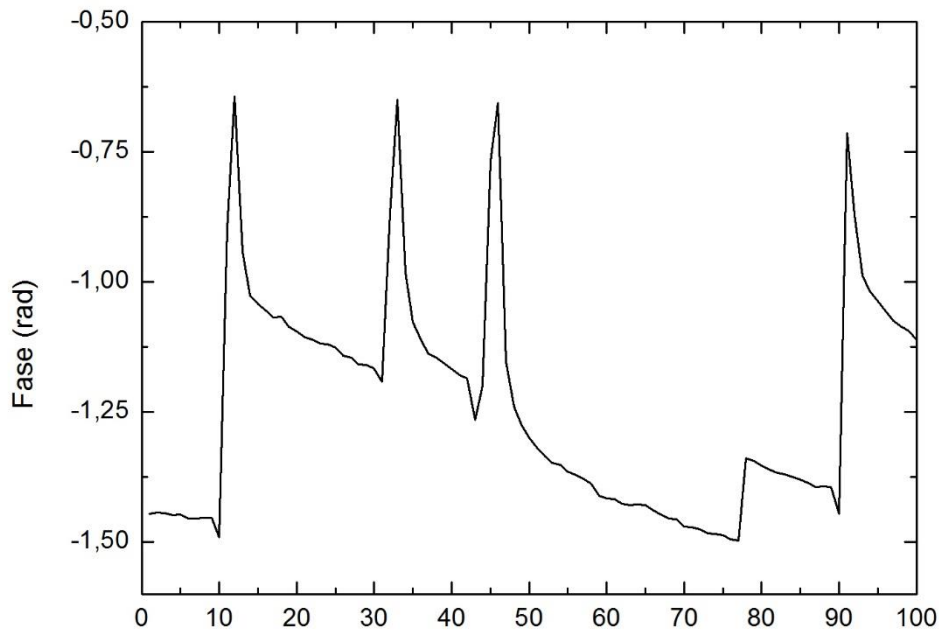


Figura 4.2.2.1.2-1: Variación de fase con aplicaciones de vaho.

Con este taper se puede ver que la variación de fase que sufre no es tan significativa como con el taper número 1. Además de eso se puede observar que tras finalizar la aplicación de vaho sobre el taper le cuesta mucho más tiempo recuperar su estado inicial. Cuando, en el instante correspondiente a 47 segundos, se deja de aplicar vaho le cuesta retornar al estado inicial aproximadamente 30 segundos mientras que en el taper número 1 la recuperación era prácticamente instantánea.

A continuación, en la figura 4.2.2.1.2-2 se muestra los espectros obtenidos en el instante inicial y a los 10 segundos cuando se realiza la primera aplicación de vaho. Se puede apreciar como el espectro de la señal en el instante 10 segundos esta levemente desplazado en longitud de onda.

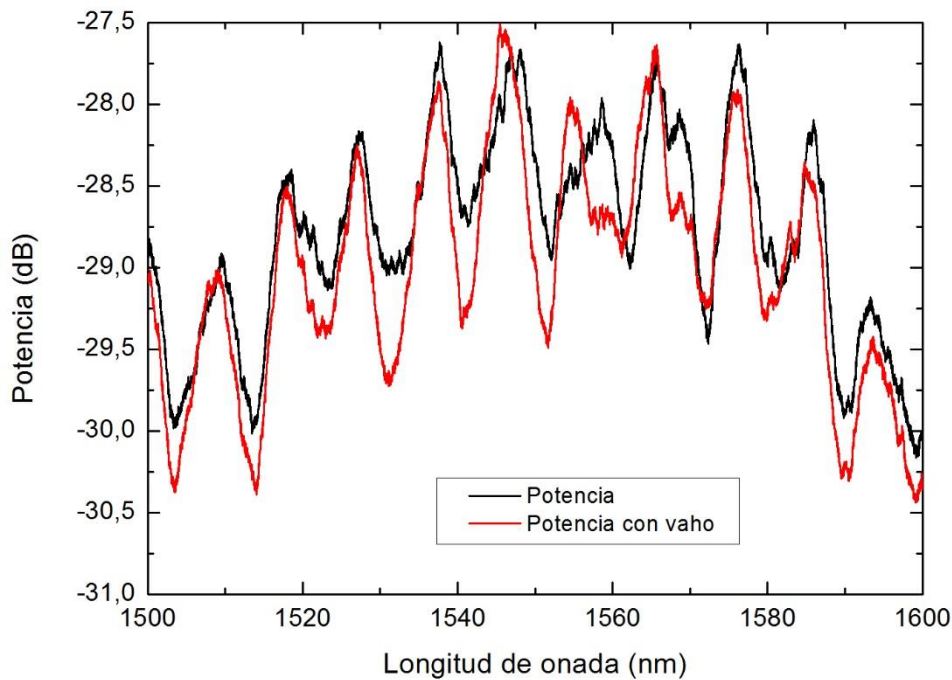


Figura 4.2.2.1.2-2: Comparación de espectros.

4.2.2.1.3 Medidas con vibraciones

Por último, se va a realizar medidas para determinar si este nuevo taper es capaz de detectar vibraciones. Lo que buscamos es determinar hasta qué punto es capaz de detectarlas y si podría ser utilizado como sensor de vibraciones.

Para este caso lo que se ha realizado ha sido un seguimiento, al igual que con las medidas de vaho, del punto centrado en 11 de su FFT. Durante un periodo de 100 segundos se han realizado pequeños golpes sobre la superficie en la cual se encontraba el taper y se han analizado las variaciones de fase que se producían durante ese intervalo de tiempo.

Estas variaciones se muestran representadas en la figura 4.2.2.1.3-1. Como era de esperar, dependiendo de la intensidad del impacto sobre la superficie se aprecia más o menos variación de fase. En este caso se puede observar que la variación de fase es mayor que la conseguida con el taper número 1 pero al igual que pasaba con las medidas de vaho le cuesta recuperar el estado inicial. En estas medidas que se han realizado como no se ha dejado suficiente margen entre los pequeños golpes que se han dado sobre la superficie, se puede ver en la figura que la fase no llega en ningún momento a retornar a su valor inicial.

Con la respuesta obtenida se puede afirmar que, aunque el taper sea sensible a las vibraciones precisa un mayor tiempo para la recuperación de su estado inicial, lo que puede ser un factor limitante en algunas aplicaciones.

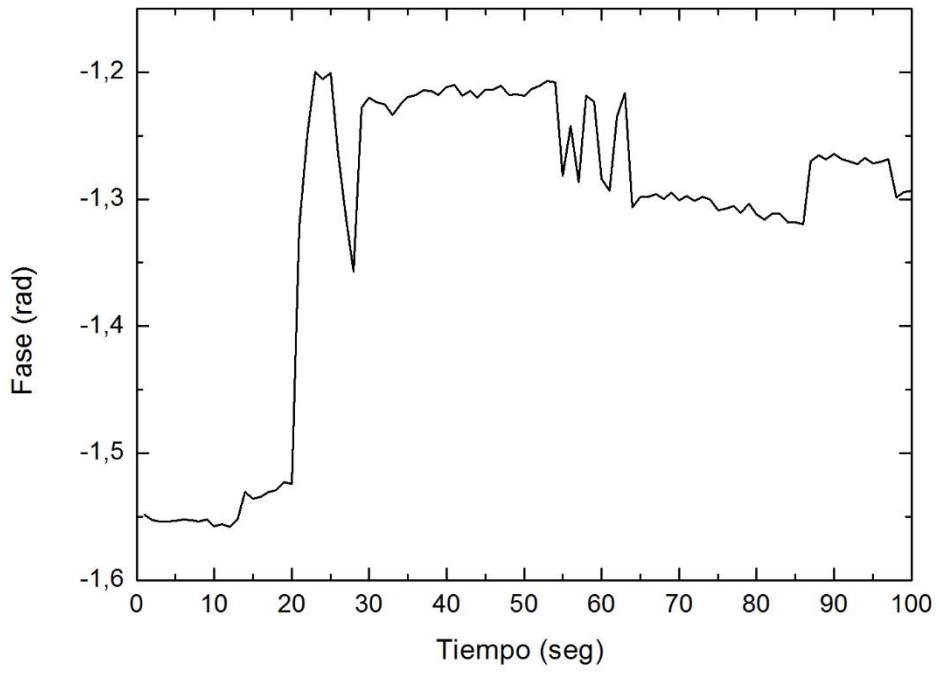


Figura 4.2.2.1.3-1: Variación de fase con vibraciones.



4.3 Conclusiones

La finalidad de este estudio realizado como trabajo final de grado ha sido estudiar tanto la fabricación como el comportamiento de los tapers en su uso como sensores. Tras realizar un estudio intensivo sobre las fibras estrechadas denominadas “tapers” se llegó a la conclusión de la importancia que tenía el ángulo de inclinación del taper para el acoplo del modo fundamental a modos de orden superior a lo largo de la cintura del taper para el uso de éstos como sensores de fibra óptica.

En la primera parte del trabajo experimental se ha estudiado, con ayuda del reflectómetro LUNA, el comportamiento que tenía la luz al atravesar dicha estructura. El objetivo del trabajo ha sido demostrar la influencia que tienen tanto la pendiente en las transiciones como el resto de parámetros físicos de los tapers.

Con los resultados obtenidos se ha podido comprobar que al colocar en primer lugar una transición más abrupta se consiguen mejores resultados. Si observamos los espectros que se han obtenido al colocar a la salida del LUNA la transición que se ha ido modificando (con longitudes de 0.5, 1, 1.5 y 2 cm y al final la transición de valor fijo 1 cm), se puede afirmar que obtenemos mejores resultados para el taper número 1 que se corresponde con una transición inicial de 0.5 cm.

Para la utilización de los tapers como sensores nos interesa que su respuesta frecuencia compuesta por distintos lóbulos tenga una diferencia entre sus máximos y sus mínimos lo mayor posible. Con el taper número 1 se obtiene una diferencia de unos 20 dB cuando se conecta directamente y de unos 30 dB con ayuda del *beam splitter*. Conforme se va aumentando el valor de la primera transición estos valores empeoran.

Gracias a este estudio no solo se ha podido comprobar la importancia del ángulo de inclinación del taper en la primera transición, sino que también se ha podido comprobar que al cambiar la configuración del taper y colocar la transición fija de valor 1 cm en primer lugar, la respuesta del taper se ve afectada por la longitud que presenta en este caso la segunda transición.

Con los resultados obtenidos se ha podido comprobar una vez más que teniendo una segunda transición más corta, y por lo tanto una pendiente más abrupta, se obtienen mejores resultados. Por este motivo, utilizando el taper número 1 se vuelve a obtener los mejores resultados de todos los casos analizados experimentalmente. Se ha obtenido una respuesta con una diferencia entre sus máximos y sus mínimos de 10 dB y con ayuda del *beam splitter* de unos 24 dB.

Comparando estos datos obtenidos para el taper número 1 se puede afirmar que, aunque se ha comprobado la importancia que tiene la inclinación de la pendiente de la segunda transición del taper, va a ser mucho más significativa la inclinación de la primera transición del taper.

En la segunda parte del trabajo experimental se ha intentado reforzar las conclusiones sacadas en la primera comprobando la capacidad de respuesta que los tapers ya caracterizados



podían tener frente a diversos factores como la temperatura, la presencia de humedad o las vibraciones, para poder ser utilizados como sensores. Las pruebas se han realizado con el taper número 1 y el número 2. Con los resultados que se han obtenido a lo largo del estudio se puede afirmar que el taper número 1 es el que mejor responde a las diferentes medidas.

El taper número 1 ha mostrado una respuesta lineal a lo largo de las medidas de temperatura realizadas con la cámara climática en todo el rango de medida, al contrario que el taper número 2 con el que se obtenía una respuesta exponencial a lo largo del barrido de temperatura y para el cual solo presenta sensibilidad en el rango de 30°C a 40°C. Para las medidas realizadas con vibraciones y humedad el taper número 1 ha resultado tener mayor sensibilidad y mayor capacidad de recuperación.

Por lo tanto, se puede concluir con este estudio afirmando que el taper número 1, con la pendiente de 0.5 cm de longitud como pendiente inicial, ha sido la configuración con mayor capacidad para actuar como sensor ya que se ha obtenido una respuesta lineal, en el rango de 30°C a 70 °C, con un valor de $-0.0211\text{rad}/^\circ\text{C}$ de sensibilidad. Además, ha demostrado tener una alta sensibilidad a la humedad y una gran capacidad de recuperación, conforme se dejaba de aplicarle humedad, al contrario que el taper número 2. Algo muy similar ha ocurrido con las medidas realizadas con vibraciones con las que se ha vuelto a demostrar que el taper número 1 es el que tiene una capacidad mayor para actuar como sensor.



5. Bibliografía

- [1] “TMS User’s Manual”, 3SAE Technologies, Inc. 2016.
- [2] Xu, X.-M., Yue, Y.-L., Fang, L.-G., Li, W. “Design of photonic crystal polarizing beam splitter based on directional coupling” *Bandaoti Guangdian/Semiconductor Optoelectronics*, 30 (3), pp. 347-350, 2009.
- [3] D.Paschotta, “*Encyclopedia of Laser Physics and Technology - beam splitters, power splitter, beamsplitter, thin-film polarizer, non-polarizing*”, 2017, [online] Rp-photonics.com. https://www.rp-photonics.com/beam_splitters.html.
- [4] Edmund Optics., Inc., E., “*Polarizing Beamsplitters*”, 2017, [online] Edmundoptics.com. <https://www.edmundoptics.com/optics/beamsplitters/polarizing-beamsplitters>.
- [5] Solvej Knudsen and Freja Thilde Pedersen, “*Producing adiabatic fiber tapers*”, University of Copenhagen, 2014.
- [6] Ion Iturri Gil, “*Diseño y caracterización de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda mediante láseres de fibra con emisión multilínea*”, Trabajo fin de máster, UPNA, 2014.
- [7] Yanping Xu, Ping Lu, Liang Chen and Xiaoyi Bao, “*Recent Developments in Micro-Structured Fiber Optic Sensors*”, *Fibers* 2017, 5, 3, MDPI, 2017
- [8] S. Lacroix, R. Black, C. Veilleux, J. Lapierre, “*Tapered single-mode fibers: external refractive index dependence*”, *Applied Optics*, ISSN 0003-6935, Vol. 25, No. 15, p. 2468, 1986.
- [9] R. J. Black, S. Lacroix, F. Gonthier, J. D. Love, “*Tapered single-mode fibers and devices. Part 2. Experimental and theoretical quantification*”, *IEE Proceedings J*, ISSN 0267-3932, Vol.138, No. 5, p. 355, 1991.
- [10] L. C. Bobb, P. M. Shankar, H. D. Krumboltz, “*Bending effects in biconically tapered single-mode fibers*”, *Journal of Lightwave Technology*, ISSN 0733-8724, Vol. 8, No.7, p.1084, 1990.
- [11] J. M. Lopez-Higuera, “*Handbook of optical fibre sensing technology*”, Baffins Lane: John Wiley and Sons, ISBN 0-471-82053-9, p. 795, 2002.
- [12] H. A. Muñoz-Ossa, E. Reyes-Vera, J. D. Causado-Buevas, G. J. Lora-Jaramillo, D. M. Dominguez-Gómez, P. Torres, “*Medición del porcentaje de grasa en leche líquida usando “tapers” de fibra óptica*”, *Revista Colombiana de Física*, Vol. 43, No. 3, pp. 926-928, 2011.
- [13] P. W. Milonni & J. H. Eberly, “*Laser Physics, sec.*”, JohnWhiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-470-38771-9, 8, pp. 6-7, 2010.
- [14] H. L. Sørensen, “*Controlling the shape of subwavelength-diameter tapered optical fibers*”, Niels Bohr Institute, Faculty of Science, University of Copenhagen, 2013.
- [15] J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart, R. J. Black, S. Lacroix, F. Gronthier, “*Tapered single-mode _bres and devices*”, *IEE Proceedings-J, Optoelextronics* 138.5, pp. 343-347, with appendix 10, 1991.
- [16] L. Niu, C. –L. Zhao, H. Gong, Y. Li, S. Jin, “*Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modalinterferometer in single mode fiber*”, *Opt. Commun*, 333, pp. 11–15, 2014.



- [17] L. Xu, L. Jiang, S. Wang, B. Li, Y. Lu, “High-temperature sensor based on an abrupt-taper Michelson interferometer in single-mode fiber”, *Appl. Opt.*, 52, pp. 2038–2041, 2013.
- [18] B. Li, L. Jiang, S. Wang, L. Zhou, H. Xiao, H.-L. Tsai, “Ultra-abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer sensors”, *Sensors*, 11, pp. 5729–5739, 2011.
- [19] Z. Tian, S. -H. Yam, J. Barnes, W. Bock, P. Greig, J. M. Fraser, H. -P. Loock, R. D. Oleschuk, “Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 20, pp. 626–628, 2008.
- [20] Z. Tian, S. -H. Yam, “In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder Interferometric strain sensor”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 3, pp. 161–163, 2009.
- [21] D. Monzon-Hernandez, A. Martinez-Rios, I. Torres-Gomez, G. Salceda-Delgado, “Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers” *Opt. Lett.*, 36, pp. 4380–4382, 2011.
- [22] P. Lu, G. Lin, X. Wang, L. Chen, X. Bao, “Lateral stress detection using a tapered fiber Mach-Zehnder interferometer”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 24, pp. 2038–2041, 2012.
- [23] J. -M. Hsu, C. -L. Lee, H.-P. Chang, W. C. Shih, C. -M. Li, “Highly sensitive tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level sensing”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 25, pp. 1354–1357, 2013.
- [24] Q. Wang, W. Wei, M. Guo, Y. Zhao, “Optimization of cascaded fiber tapered Mach-Zehnder interferometer and refractive index sensing technology”, *Sens. Actuators B Chem*, 222, pp. 159–165, 2016.
- [25] Y. Li, E. Harris, L. Chen, X. Bao, “Application of spectrum differential integration method in an in-line fiber Mach-Zehnder refractive index sensor”, *Opt. Express*, 18, pp. 8135–8143, 2010.
- [26] E. Harris, Y. Li, L. Chen, X. Bao, “Fiber-optic Mach-Zehnder interferometer as a high-precision temperature sensor: Effects of temperature fluctuations on surface biosensing”, *Appl. Opt.*, 49, pp. 5682–5685, 2010.
- [27] Y. Li, L. Chen, E. Harris, X. Bao, “Double-pass in-line fiber taper Mach-Zehnder interferometer sensor”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 22, pp. 1750–1752, 2010.
- [28] C. -L. Lee, W. C. Shih, J. -M. Hsu, J.-S. Horng, “Asymmetrical dual tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for fiber-optic directional tilt sensor”, *Opt. Express*, 22, pp. 24646–24654, 2014.
- [29] Z. Tian, S.S. Yam, H.-P. Loock, “Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber”, *Opt. Lett.*, 33, pp. 1105–1107, 2008.
- [30] L. Amaral, O. Frazão, J. Santos, A. L. Ribeiro, “Fiber-optic inclinometer based on taper Michelson interferometer”, *IEEE Sens. J.*, 11, pp. 1811–1814, 2011.
- [31] P. Lu, J. Harris, Y. Xu, Y. Lu, L. Chen, X. Bao, “Simultaneous refractive index and temperature measurements using a tapered bend-resistant fiber interferometer”, *Opt. Lett.*, 37, pp. 4567–4569, 2012.
- [32] J. Harris, P. Lu, H. Larocque, Y. Xu, L. Chen, X. Bao, “Highly sensitive in-fiber interferometric refractometer with temperature and axial strain compensation”, *Opt. Express*, 21, pp. 9996–10009, 2013.
- [33] J. Harris, P. Lu, H. Larocque, L. Chen, X. Bao, “In-fiber Mach-Zehnder interferometric refractive index sensors with guided and leaky modes”, *Sens. Actuators B Chem.*, 206, pp. 246–251, 2015.



- [34] Y.Xu, P.Lu, Z.Qin, J.Harris, F.Baset, V.R.Bhardwaj, X .Bao, “*Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer*”, *Opt. Express*, 21,pp.3031–3042, 2013.
- [35] A.W.Snyder, J.Love, “*Optical Waveguide Theory*”, 1st ed., Springer Science & Business Media: Boston, MA, USA, 2012.
- [36] K.Tiefenthaler, W.Lukosz, “*Sensitivity of grating couplers as integrated-optical chemical sensors*”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 6,pp.209–220, 1989.
- [37] J.Love, W.Henry, “*Quantifying loss minimisation in single-mode fibre tapers*”, *Electron. Lett.*, 17, pp.912–914, 1986.
- [38] T.A.Birks, Y.W. Li, “*The shape of fiber tapers*”, *J. Lightwave Technol.*, 10, pp.432–438, 1992.
- [39] T.Yadav, R.Narayanaswamy, M.A.Bakar, Y.M.Kamil, M.Mahdi, “*Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index sensor and its application to protein sensing*”, *Opt. Express*, 22, pp.22802–22807, 2014.
- [40] M.Zibaii, H.Latifi, M.Karami, M.Gholami, S.Hosseini, M. Ghezelayagh, “*Non-adiabatic tapered optical fiber sensor for measuring the interaction between α -amino acids in aqueous carbohydrate solution*”, *Meas. Sci. Technol.*, 21, 105801, 2010.
- [41] A.J.Fielding, K.Edinger, C.C.Davis, “*Experimental observation of mode evolution in single-mode tapered optical fibers*”, *J. Lightwave Technol.*, 17, pp.1649–1656, 1999.
- [42] J.Love, W.Henry, W.Stewart, R.Black, S.Lacroix, F.Gonthier, “*Tapered single-mode fibres and devices*”, I. Adiabaticity criteria. *IEE Proc. J.*, 138, pp.343–354, 1991.
- [43] K.Lai, S.Leon-Saval, A.Witkowska, W.Wadsworth, T.Birks, “*Wavelength-independent all-fiber mode converters*”, *Opt. Lett.*, 32, pp.328–330, 2007.
- [44] S.Yerolatsitis, I.Gris-Sánchez, T.Birks, “*Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers*”, *Opt. Express*, 22, pp.608–617, 2014.
- [45] I.M.White, H.Oveys, X.Fan, “*Liquid-core optical ring-resonator sensors*” *Opt. Lett.*, 31, pp.1319–1321, 2006.
- [46] A.M.Armani, K.J. Vahala, “*Heavy water detection using ultra-high-Q microcavities*”, *Opt. Lett.*, 31, pp.1896–1898, 2006.
- [47] D.Keng, S.McAnanama, I.Teraoka, S.Arnold, “*Resonance fluctuations of a whispering gallery mode biosensor by particles undergoing Brownian motion*”, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 103902, 2007.
- [48] A.B.Socorro, I.Del Villar, J.M.Corres, F.J.Arregui, I.R.Matias, “*Tapered single-mode optical fiber pH sensor based on lossy mode resonances generated by a polymeric thin-film*”, *IEEE Sens. J.*, 12, pp.2598–2603, 2012.
- [49] N.Díaz-Herrera, M.Navarrete, O.Esteban, A.González-Cano, “*A fibre-optic temperature sensor based on the deposition of a thermochromic material on an adiabatic taper*” *Meas. Sci. Technol.*, 15, 353, 2003.
- [50] Ó.Esteban, N.Díaz-Herrera, M.-C.Navarrete, A.González-Cano, “*Surface plasmon resonance sensors based on uniform-waist tapered fibers in a reflective configuration*” *Appl. Opt.*, 45,pp. 7294–7298, 2006.
- [51] N.Díaz-Herrera, A.González-Cano, D.Viegas, J.L.Santos, M.-C. Navarrete, “*Refractive index sensing of aqueous media based on plasmonic resonance in tapered optical fibres operating in the 1.5 μm region*”, *Sens. Actuators B Chem.*, 146, pp.195–198, 2010.



- [52] C.-L. Lee, "Spectral analysis of waveguide tapered microfiber with an ultrathin metal coating", *Opt. Express*, 18, pp.14768–14777, 2010.
- [53] N.D.Herrera, Ó.Esteban, M.-C.Navarrete, A.González-Cano, E.Benito-Peña, G.Orellana, "Improved performance of SPR sensors by a chemical etching of tapered optical fibers", *Opt. Lasers Eng.*, 49, pp.1065–1068, 2011.
- [54] G.Kakarantzas, S.Leon-Saval, T.Birks, P.S.J.Russell, "Low-loss deposition of solgel-derived silica films on tapered fibers", *Opt. Lett.*, 29, pp.694–696, 2004.
- [55] M.Z.Ab Razak, S.A.Reduan, A.S.Sharbirin, N.Jamaludin, M.Z.Zulkifli, H.Ahmad, "Noncontact Optical Displacement Sensor Using an Adiabatic U-Shaped Tapered Fiber", *IEEE Sens. J.*, 15, pp.5388–5392, 2015.
- [56] K.Q.Kieu, M. Mansuripur, "Biconical fiber taper sensors", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 18, 2239, 2006.
- [57] F.J.Arregui, I.R.Matías, M.López-Amo, "Optical fiber strain gauge based on a tapered single-mode fiber", *Sens. Actuators A Phys.*, 79, pp.90–96, 2000.
- [58] S.Mas, J.Martí, D.Monzón-Hernández, J.Palací, "Low-cost refractive index and strain sensor based on tapered fibers", *Opt. Commun.*, 361, pp.99–103, 2016.
- [59] L.Xu, Y.Li, B.Li, "Nonadiabatic fiber taper-based Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing", *Appl. Phys. Lett.*, 101, 153510, 2012.
- [60] W.B.Ji, Y.C.Tan, B.Lin, S.C.Tjin, K.K.Chow, "Nonadiabatically Tapered Microfiber Sensor with Ultrashort Waist", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 26, pp.2303–2306, 2014.
- [61] M.Muhammad, A.Jasim, H.Ahmad, H.Arof, S.Harun, "Non-adiabatic silica microfiber for strain and temperature sensors", *Sens. Actuators A Phys.*, 192, pp.130–132, 2013.
- [62] A.Layeghi, H.Latifi, O.Frazao, "Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 26, pp.1904–1907, 2014.
- [63] Y.Zheng, X.Dong, C.C.Chan, P.P.Shum, H.Su, "Optical fiber magnetic field sensor based on magnetic fluid and microfiber mode interferometer", *Opt. Commun.*, 336, pp.5–8, 2015.
- [64] Z.J.Liu, Y.S. Yu, X.Y.Zhang, C.Chen, C.C.Zhu, A.H.Meng, S.M.Jing, H.B.Sun, "An optical microfiber taper magnetic field sensor with temperature compensation", *IEEE Sens. J.*, 15, pp.4853–4856, 2015.
- [65] Z.Yu, L.Jin, L.Sun, J.Li, Y.Ran, B.-O.Guan, "Highly Sensitive Fiber Taper Interferometric Hydrogen Sensors", *IEEE Photonics J.*, 8, pp.1–9, 2016.
- [66] Daniel Ventura Rípodas, "Estudio experimental de un conversor en longitud de onda usando láseres de fibra óptica" Trabajo fin de grado, UPNA, 2016.
- [67] "Optical Sensing Interrogator, sm125" Micron Optics, Inc. 2009
- [68] Jesús M. Corres, Francisco J. Arregui, Ignacio R. Matías, "Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings" Elsevier, 2006
- [69] César Elosúa Aguado, "Contribution to the development of optical fibre sensors to detect volatile organic compounds and their potential application in opto-electronic noses", Tesis doctoral, Univ. Púb. Navarra, 2010.
- [70] Joel Villatoro, David Monzón-Hernández, and Efrain Mejía, "Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors" *Applied optics*, Vol. 42, No. 13, pp. 2278-2283, Optical Society of America, 2003.



- [71] Frangois Gonthier, Jean Lapierre, Christian Veilleux, Suzanne Lacroix, and Jacques Bures, *“Investigation of power oscillations along tapered monomode fibers”* Applied optics, Vol. 26, No. 3, pp 444-449, Optical Society of America, 1987.
- [72] Luna Innovations Incorporated, *“Optical backscatter reflectometer (Model OBR 4600)”* LTOBR4600, 2014
- [73] W. K. Bums, M. Abebe, and C. A. Villarruel, *“Parabolic model for shape of fiber taper”* Applied optics, Vol. 24, No. 17, pp. 2753-2755, Optical Society of America, 1985.
- [74] J.A. Sánchez-Martín, E. Bernabeu, A. Rodríguez-Aramendía, A. Villalba, E. Cruzado, M.Pardo de Santayana, *“Tapered optical fibre sensor for detection of hydrocarbon spills in seawater”* 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, edited by José Miguel López-Higuera, Julian Jones, Manuel López-Amo, José Luis Santos, Proc. of SPIE Vol. 9157, 91574E, 2014.
- [75] Suzanne Lacroix, Richard J. Black, Christian Veilleux, and Jean Lapierre, *“Tapered single-mode fibers: external refractive-index dependence”* Applied optics, Vol. 25, No. 15, pp. 2468-2469, 1986.
- [76] J.D. Love, W.M. Henry, W.J. Stewart, R.J. Black, S. Lacroix, F. Gonthier, *“Tapered single-mode fibres and devices”* IEE PROCEEDINGS-J, Vol. 138, No. 5, pp. 343-354, 1991.
- [77] R.J. Black, S. Lacroix, F. Gonthier, J.D. Love, *“Tapered single-mode fibres and devices”* IEE PROCEEDINGS-J, Vol. 138, No. 5, pp. 355-364, 1991.