



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**EFEECTO DEL RADIO DE CURVATURA EN UN TAPPER DE FIBRA ÓPTICA
DE DOS MODOS SOBRE LA CONVERSIÓN DE MODO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera en Telecomunicaciones

AUTORA: Kevin Fernando Espinosa Tipan

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña

Quito-Ecuador

2024

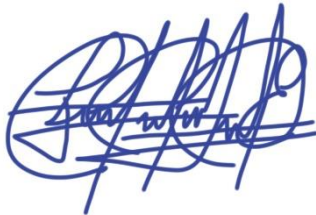
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Fernando Espinosa Tipan con documento de identificación N° 1723614234; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 23 de febrero del año 2024

Atentamente,



Kevin Fernando Espinosa Tipan

1723614234

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Kevin Fernando Espinosa Tipan con documento de identificación No. 1723614234, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Artículo Académico: “Efecto del radio de curvatura en un tapper de fibra óptica de dos modos sobre la conversión de modo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de febrero del año 2024

Atentamente,



Kevin Fernando Espinosa Tipan

1723614234

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EFECTO DEL RADIO DE CURVATURA EN UN TAPPER DE FIBRA ÓPTICA DE DOS MODOS SOBRE LA CONVERSIÓN DE MODO, realizado por Kevin Fernando Espinosa Tipan con documento de identificación N°1723614234, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción articulo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de febrero del año 2024

Atentamente,



Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.

1713583126

DEDICATORIA

"Dedicado a aquellos que han sido mis pilares inquebrantables en el camino hacia la culminación de mi título de ingeniero en telecomunicaciones. A mi amada madre Doris, cuyo inmenso esfuerzo y dedicación han sido la fuente de inspiración que me impulsa a alcanzar mis metas. A mi padre, mi amigo y apoyo incondicional, cuyo ejemplo me ha guiado hacia la excelencia y la integridad. A mi hermano Dennis, mi respaldo constante y admirador silencioso, cuyo apoyo ha sido invaluable en cada paso del camino. A mi novia Alejandra, cuya presencia espiritual me ha dado fuerzas para perseverar en los momentos más desafiantes. A todos ustedes, les dedico este logro, pues son la piedra angular sobre la cual se ha construido mi éxito. Soy el resultado de su amor, ejemplo y sacrificio, y por ello, este trabajo lleva impreso su legado en cada página. Gracias por ser mi luz en la oscuridad y mi motivación constante. Este título es tanto suyo como mío, pues juntos hemos alcanzado la cima. ¡Por siempre agradecido!

AGRADECIMIENTO

Mi más profundo agradecimiento a Dios, cuya infinita misericordia me ha concedido la salud, la fortaleza y la perseverancia necesarias para superar los desafíos que se presentaron a lo largo de mi carrera universitaria. A mis padres, quienes han sido mi sostén y han hecho posibles mis sueños, especialmente el de convertirme en ingeniero. Su apoyo inquebrantable y sacrificio han sido el pilar fundamental de mi éxito.

Agradezco de manera especial a mi tutor, cuya paciencia, conocimiento y sabiduría en el campo de la investigación y las telecomunicaciones han sido una fuente inagotable de inspiración y aprendizaje. Sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi formación profesional.

También quiero expresar mi gratitud a cada uno de mis docentes a lo largo de esta travesía académica. De cada uno de ellos he recibido valiosas lecciones no solo en el ámbito científico, sino también en el personal, que han enriquecido mi camino hacia el conocimiento.

A la Universidad Politécnica Salesiana, mi hogar durante estos años de formación, le estoy eternamente agradecido. Ha sido el espacio donde he crecido intelectualmente, donde he forjado amistades duraderas y donde he encontrado un entorno propicio para desarrollar todo mi potencial.

A cada persona que ha contribuido, directa o indirectamente, en mi formación y crecimiento académico, les extiendo mi más sincero agradecimiento. Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de muchos, y por ello, mi gratitud es infinita. ¡Gracias por ser parte de este viaje y por compartir conmigo este momento de alegría y realización!

EFECTO DEL RADIO DE CURVATURA EN UN TAPPER DE FIBRA ÓPTICA DE DOS MODOS SOBRE LA CONVERSIÓN DE MODO

EFFECT OF CURVATURE RADIUS ON A TWO-MODE FIBER OPTICAL TAPPER ON MODE CONVERSION

Kevin F. Espinosa¹ , Milton N. Tipán² 

Resumen

Este artículo, evalúa el efecto de la curvatura en un taper de dos modos LP01 y LP11, con radio inicial de $5\mu m$ y radio final de $1.5\mu m$, en una longitud de onda de $1550nm$. Los resultados muestran que para un taper de longitud $15mm$ el radio de curvatura mínimo para un buen desempeño del taper es de $70\mu m$.

Palabras clave: Taper, FMF, Radio de curvatura, Filtro modal.

Abstract

This article evaluates the effect of curvature in a two-mode taper LP01 and LP11, with initial radius of $5\mu m$ and final radius of $1.5\mu m$, at a wavelength of $1550nm$. The results show that for a taper of length $15mm$ the minimum radius of curvature for good performance of the taper is $70\mu m$.

Keywords: Taper, FMF, Bend radius, Modal Filter

¹Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: kespinosat@est.ups.edu.ec

²Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

1. Introducción

Los tapers en esencia son segmentos de fibra óptica adelgazada y fundida en forma cónica (Conical Fused Optical Fiber Taper, CFOFT), son segmentos de fibra óptica que por medio de distintos métodos de transformación han sido reducidos en diámetro. Para ser un taper su estructura debe presentar estrictamente una forma cónica [1] [2].

Un uso común del taper es un convertidor de modos en el cual se utiliza un taper para encargarse el trabajo de eliminar modos no deseados, es decir que los modos al ingresar al taper con un diámetro tradicional en el núcleo de la fibra y llegar hasta el punto de estrechamiento con un diámetro reducido además de predeterminado, provocará que el modo no se pueda propagar a la salida del estrechamiento debido a las nuevas condiciones de propagación, enviando al modo no deseado a perderse en la cubierta de la fibra [3]. En estudios recientes se ha analizado el comportamiento del taper al ser expuesto a una fuente de luz con el objetivo de probar su óptima funcionalidad como sensor, dando como resultado la importancia del ángulo de inclinación de la zona de estrechamiento del taper, para acoplar y manipular el comportamiento de la fuente de luz, así como la de controlar el paso de los modos deseados y de los no deseados. Con ayuda de un reflectómetro (LUNA OBR 4600) se ha seleccionado como óptimos diferentes tapers con curvaturas estándar tras ser sometidos a variaciones de temperatura, humedad y vibración [4]. Además, se ha realizado el prototipo de un taper de microfibra mediante la utilización de electrodos conectados a una fuente de poder genera un arco eléctrico continuo que provoca el estrechamiento al pasar por el arco eléctrico. La intensidad del arco eléctrico permite modificar a voluntad la curvatura del estrechamiento en el taper y con ello permitirá seleccionar los modos que resultarán tras el paso por el taper [5]. Por otra parte, existe un gran número de dispositivos que basan su diseño y funcionalidad en la manipulación de la fibra óptica, para controlar o mitigar de ser posible la dispersión modal de la fibra óptica multimodo (Multimode Fiber, MMF), el cual provoca la disminución del producto ancho de banda-distancia de transmisión [6]. En la MMF se transmiten varios modos de luz a la vez siendo la transmisión resultante diferente a la transmisión original, debido a que cada rayo de luz sigue una trayectoria diferente este desplazamiento varía en longitud y tiempo, siendo este desfase el que provoca un ensanchamiento en la señal resultante provocando interferencia intersímbolo [7]. Una de las formas de mitigar este problema es el uso del índice gradual los cuales brindan la capacidad de que los rayos que se alejan del centro aumenten su velocidad de propagación, permitiendo que la brecha de tiempo se acorte es decir que reduce la dispersión modal, otro método es el uso de filtros modales y con-

vertidores modales que permiten que pase solo el modo fundamental o que los modos de alto orden redirijan su energía hacia el modo fundamental, como lo hace el taper. Debido a que estos dispositivos son frágiles y su eficiencia depende si se mantiene o no la forma cónica, lo cual es poco probable debido a los cambios de temperatura y manipulación del mismo que hace que este se deforme y se doble. En este artículo estudia el efecto de la curvatura del taper sobre la conversión del modo adiabático y la eliminación de modos no guiados.

2. Taper de fibra óptica

El taper de fibra óptica se basan en un cono de fibra monomodo, está conformado por una estructura que comprende un segmento estirado que se lo puede identificar como cintura cónica [10]. Como resultante de las transiciones de transformación cónicas logran transformar al modo fundamental LP01 del núcleo en la fibra y elimina los modo del revestimiento en la cintura estrecha [11].

En la Fig. 1 se señala gráficamente las secciones que componen el taper, la sección comprendida y etiquetada entre P-A como el segmento de la fibra óptica que ingresa al taper, entre A-B como la sección donde se realizará el estrechamiento de la fibra óptica y la sección B-Q la sección donde continua la fibra óptica luego del estrechamiento. Adicional a eso señala la caracterización de las longitudes de las secciones la fibra donde toma a P-A como $L_{P-A}/2$, la longitud del estrechamiento (taper) como L_t y B-Q como $L_{B-Q}/2$.

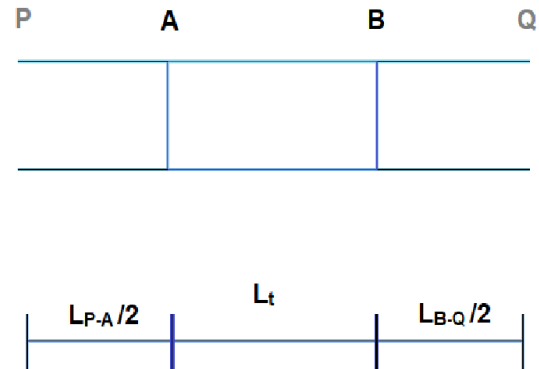


Figura 1. Segmentación del la zona del taper.

La Fig. 2 detalla gráficamente la estructura interna del taper es decir toma L_t y la caracteriza en segmentos más pequeños donde L_0 son los segmentos proporcionalmente iguales correspondientes a la deformación, El primer segmento comprendido entre A-A_{in} la cual empieza con una deformación cónica

con la desembocadura dede la fibra óptica sin modificación y terminando en el estrechamiento deseado y el segundo segmento B_{in} -B donde la fibra tiene una deformación cónica con inicio en el estrechamiento deseado y desembocadura en la fibra que continua luego del taper. El segmento delimitado como L_{tin} es el segmento donde actúa el taper y conserva una estrecha dura ente A_{in} - B_{in} .

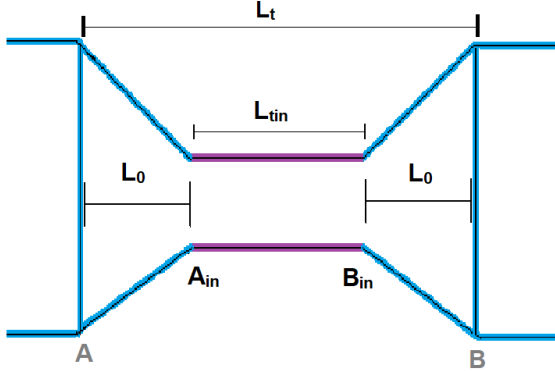


Figura 2. Estructura longitudinal del taper.

Para determinar las longitudes de la fibra antes y después de la deformación, se requiere la formulación de ecuaciones de longitud, como se describe en la ecuación 1, que representa la Ley de Distancia.

$$2L_0 + L_{tin} = x + L_t, \quad (1)$$

El modelo se basa en dos ecuaciones fundamentales que surgen a partir de la figura 1 y figura 2. En donde se compara la distancia entre A-B de la fibra con estrechamiento y la fibra óptica sin estrechamiento, donde L_{tin} es la función de x y L_t es el valor inicial para $x = 0$. La segunda ecuación se obtiene al considerar como un modelo tridimensional donde se toma en cuenta el radio de curvatura (r_c) y el radio de curvatura en un tiempo determinado [5].

$$\pi (r_c - \delta r_c)^2 (L_{tin} + \delta x) = \pi r_c^2 L_{tin}, \quad (2)$$

Donde, δr_c representa la variación radial de la fibra. Siendo $\delta r_c^2 = 0$, se transforma en la ecuación 3, conocida como ley de volumen o segunda ley fundamental.

$$\frac{dr_c}{dx} = \frac{r_c}{2L_{tin}}, \quad (3)$$

Donde, la longitud L_{tin} es la distancia en la cual se estrechaba mediante calor y una tensión constante en los extremos de la fibra óptica, por lo que se utiliza una fuente de calor estática con un valor contante ($L_{tin}(x) = L_t$). El estrechamiento de la fibra óptica esta definida por una función exponencial que depende

de una distancia de elongación, dada por la ecuación 4 [5].

$$r_c(x) = r_0 e^{x/2L_t}, \quad (4)$$

Donde, r_0 es el radio inicial del segmento que se desea estrechar es decir la longitud L_t , además de denotar las zona de transición del estrechamiento entre la fibra y el estrechamiento deseado (L_{tin}) tanto en entrada como en salida del taper como L_0 se obtiene la ecuación 5.

$$L_0(x) = x/2, \quad (5)$$

Adicionalmente al remplazar $x = 2L_0$ en la Ec. 5, se obtiene la función del perfil de la zona de transición del taper [5].

$$r(L_0) = r_0 e^{L_0/L_t}, \quad (6)$$

Cabe destacar la existencia de perfiles adicionales al exponencial como son el perfil parabólico, sinusoidal, polinomial, entre otros, que no fueron parte del diseño del taper en este artículo [12].

3. Configuración de la simulación

Un taper fue simulado utilizando el software de cálculo numérico Matlab en el cual se ejecutó la herramienta llamada BPM-Matlab (2022b). Se realizó una simulación con una fibra de radio inicial de $5\mu m$ y se estrecho hasta un diámetro de $1.5\mu m$, índice de refracción del núcleo y el revestimiento de 1.44 y 1.45 respectivamente, para una longitud de onda en $1550m \times 10^{-9}$. Para la elección de la longitud del primer segmento del taper (L_0) se varió desde $5mm$ hasta $30mm$ distancias referidas a taper comerciales [13]- [14]. Entonces, un haz compuesto de dos modos LP01 y LP11 (y sus modos degenerados a,b) fue ingresado al taper para verificar su funcionamiento, posteriormente se simuló la curvatura del taper desde $50\mu m$ hasta $100\mu m$, el menor valor fue elegido en base al radio de ruptura de la fibra óptica monomodo, esta simulación permitió evaluar el radio de curvatura en la transmisión de modos en el taper. Finalmente, se configuro la distancia del segmento 2 (L_{tin}) como una fibra monomodo de radio $1.5\mu m$ y longitud de $5mm$.

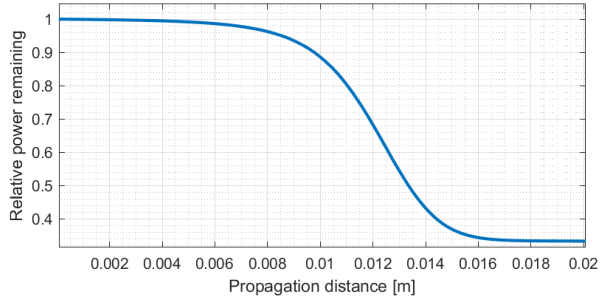
4. Resultados y análisis

El punto óptimo la longitud del taper el segmento 1 fue evaluado respecto a la máxima potencia relativa ($P.R$) de salida del taper. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de potencia con diferente longitud.

	LP01	LP11a	LP11b	
L_t (mm)	Potencia (w)	Potencia (w)	Potencia (w)	P.R. (w)
5	0,289307	2,81 e-9	2,82 e-9	0,325525
10	0,283348	2,81 e-5	2,812 e-5	0,822477
15	0,277958	5,27 e-7	5,28 e-7	0,320633
20	0,273283	9,84 e-9	9,84 e-9	0,31589
25	0,269151	1,85 e-10	1,85 e-10	0,311305
30	0,265142	3,23 e-12	3,48E-12	0,306767

Se observa que la máxima potencia relativa es conseguida a $L_t = 10mm$, consiguiéndose una potencia relativa de $0.822477W$ a la salida del primer segmento del taper. La figura 3, muestra la variación de la potencia relativa respecto a la distancia de propagación del segmento 1.

**Figura 3.** Curvatura resultante correspondiente a potencia relativa con distancia 10 mm en primer segmento.

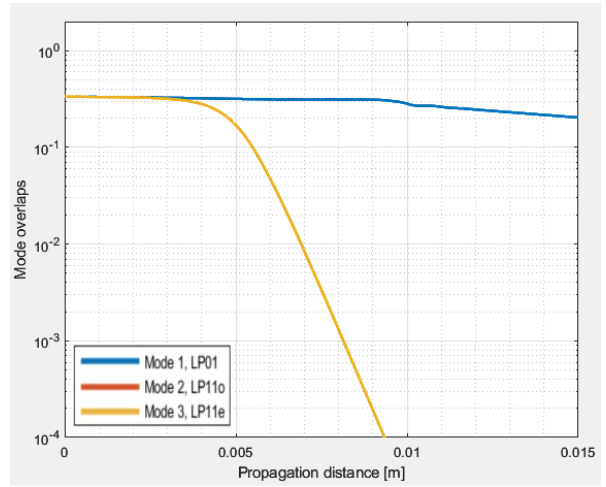
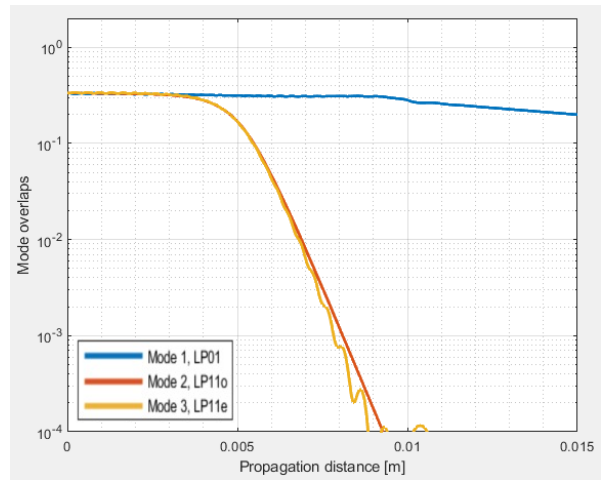
Para evaluar el efecto de la curvatura del taper en el segmento 1 se procedió a incrementar el radio de curvatura de infinito (sin curvatura) hasta $50\mu m$ radio de ruptura de la fibra monomodo, manteniendo la longitud de $10mm$. La tabla 2 muestra el comportamiento de la curvatura con respecto a la potencia relativa a la salida del segmento 1 del taper.

Tabla 2. Análisis de potencia con diferente curvatura.

	LP01	LP11a	LP11b	
r_c (μm)	Potencia (w)	Potencia (w)	Potencia (w)	P.R. (w)
50	0,276	0,00023	1,65 e-5	0,317
60	0,278	0,00016	1,94 e-5	0,319
70	0,279	0,00111	2,14 e-15	0,321
80	0,281	8,77 e-5	2,28 e-5	0,321
90	0,281	7,01 e-5	2,38 e-5	0,321
100	0,281	5,83 e-5	2,45 e-5	0,321

Se observa que el radio de curvatura $r_c < 70$, incrementa la potencia en los modos de LP11, haciendo

poco eficiente el taper. Una atenuación mayor se da en el modo degenerado LP11b en especial a un radio de curvatura de $r_c = 70$. Esto se debe a que la curvatura en la fibra produce la extinción de los modos de alto orden y en especial los modos impares [16]. La figura 4, corrobora el efecto de la curvatura del taper en los dos segmentos, se observa que sin curvatura el modo LP11 con sus dos modos degenerados decae rápidamente como se indica en la figura 4, mientras que para un radio de curvatura mayor de $70\mu m$ el modo LP11b empieza a incrementar su potencia, esto se observa en la figura 5 y para un radio de curvatura menor a $70\mu m$ esta se incrementa mucho más que 10^{-4} , como se observa en la figura 6, lo que hace al taper ineficiente ya que este modo pasa por el segmento 2.

**Figura 4.** Relación potencia vs distancia en el taper, taper sin curvatura**Figura 5.** Relación potencia vs distancia en el taper, taper con una curvatura de $100\mu m$

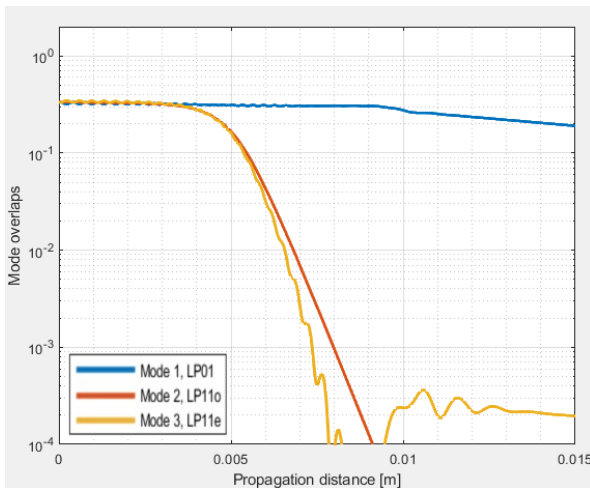


Figura 6. Relación potencia vs distancia en el taper, taper con una curvatura de $50 \mu m$

5. Conclusiones

El efecto de la curvatura de un taper de dos modos fue evaluado, una distancia óptima de $10 mm$ para el segmento cónico fue encontrado, obteniéndose una potencia relativa normalizada a la salida de este segmento de $0,822477$. El taper fue curvado desde un radio de curvatura de $50 \mu m$ hasta $100 \mu m$, los resultados muestran que el radio mínimo de curvatura que no degrada el efecto del taper es de $70 \mu m$. Esto permite obtener límites en el diseño y manejo durante la instalación de un taper en sistemas de multiplexación de modos, para no degradar su desempeño. Además, se pretende extender el estudio a taper de mayor número de modos.

Referencias

- [1] J. P. Clarkin, "Tapered Fibers and Specialty Fiber Microcomponents," in *Specialty Optical Fibers Handbook*, San Diego, Academic Press, 2007, p. 582.
- [2] Marrujo García, S. Adelgazamiento de fibra óptica monomodo de sílice y su caracterización espectral, p.45.
- [3] Garcia Rodriguez, D. (2015). Conversion modal discreta mediante acopladores ópticos pasivos.
- [4] Planillo Carrera, M. (2017). Estudio experimental de fibras estrechadas para su uso como sensores de fibra óptica.
- [5] Hernandez, M. A. R. (2020). Desarrollo, diseño e implementación de un prototipo estrechador de micro-fibra óptica.
- [6] Marrujo García, S. Adelgazamiento de fibra óptica monomodo de sílice y su caracterización espectral, p.1.
- [7] Alustiza, D. H., Mineo, M., Aredes, D. E., & Russo, N. A. (2019). Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sensado de magnitudes relevantes en ingeniería civil.
- [8] Veetikazhy, M., Hansen, A. K., Marti, D., Jensen, S. M., Borre, A. L., Andresen, E. R., ... & Andersen, P. E. (2021). BPM-Matlab: an open-source optical propagation simulation tool in MATLAB. *Optics Express*, 29(8), 11819-11832.
- [9] Mean shift for finding modes. (2012b, noviembre 27). Mean shift for finding modes - File Exchange - MATLAB CentralFile Exchange - MATLAB Central. <https://www.mathworks.com/matlabcentral>.
- [10] B. S. Kawasaki. K. O. Hill, and R. G. Lamont, "Biconical-taper singlemode fiber coupler," *Opt. Lett.*, vol. 6. pp. 327-328. 1981.
- [11] K. P. Jedrzejewski. F. Martinez, J. D. Minclly, C. D. Hussey. and F. P. Paync, "Tapered-beam expander for single-mode optical-fibre gap devices," *Electron. Lett.* vol. 22, pp. 105 - 106. 1986
- [12] T. A. Birks and Y. W. Li, "The Shape of Fiber Tapers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 432-438, 1992.
- [13] Filtro de rejilla óptica / Fibra Bragg Filtro de rejilla fabricantes y proveedores - hecho en China - Fibra Runzhou. (s. f.). <http://www.rzfibra.com/passive-fiber-optics/ftth-optical-grating-reflector-optical.html>
- [14] Fibra óptica PASS 1550nm Reflect 1310nm FWM sistemas filtro WDM canales de señal Suppliers and Manufacturers China - Precio de fábrica - Tecnología de FOCC. (s. f.). <https://www.fibresplitter.com/fiber-optic-cwdm-dwdm-mux/fttx-filter-wdm/fiber-optic-pass-1550nm-reflect-1310nm-fwdm.html>
- [15] Lomer, M. (2012). Fenómeno speckle en fibra ópticas y sus aplicaciones en sensores. *TECNIA*, 22(2), 5-16.
- [16] Rodriguez Horche, P., Muriel Fernández, M. Á., Martín Pereda, J. A. (1987). Dispositivo todo-fibra para el filtrado óptico.