



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE UN SISTEMA VIS-NIR DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA BASADO EN FIBER-OPTIC BUNDLE ANTE DESAJUSTE DE ALINEAMIENTO ÓPTICO Y ESTRÉS MECÁNICO

POR

Constanza Massiel Carrasco Alvial

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil en Telecomunicaciones.

Profesor Guía

Francisco Germán Pérez Venegas

Concepción,
13 de diciembre de 2024

© 2024 Constanza Massiel Carrasco Alvial

© 2024 Constanza Massiel Carrasco Alvial

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todo aquel que se cruzó en mi camino durante estos años universitarios, ya sea brindándome su apoyo, entregándome una palabra de aliento, dándome una mano siempre que lo necesité... pero sobretodo, cuando confiaron en mí, en mis capacidades y habilidades, siempre recordándome cuánto valgo, e incitándome a mejorar.

Quiero agradecer a mi familia. A mi papá Marcelo, por ser un hombre sabio, inteligente y autodidacta, por siempre buscar lo mejor para nosotras, por siempre brindarme su apoyo, por irme a buscar a la universidad las veces que salí tarde de certamen. A mi mamá Massiel, por su amor incondicional, por regalarme y cuidarme siempre que lo necesité, sobretodo cuando estaba estresada, ella lo notaba y encontraba la forma de relajarme, ya sea con un masaje en la espalda, o con algo rico. A mi hermana Monserrat, mi partner de gym y estudios.

Quiero agradecer a mi mejor amiga Natalia, a mi amiga de la infancia, a mi partner del colegio y años más tarde de la misma casa de estudios, quien siempre ha estado presente en mi vida, siendo un espacio seguro. A mi mejor amigo Jorge, uno de los mejores regalos que me dejó la universidad, con quien pasé largas noches haciendo trabajos y conversando de la vida, quien siempre me escuchó y aconsejó sin juzgar, quien se enorgullece de mis logros, y yo también los de él. A Felipe, por escucharme, aconsejarme, guiarme, pero sobretodo por siempre confiar en mis capacidades.

Quiero agradecer a mis profesores que tuve durante estos años universitarios. A mi profesor guía Francisco Pérez, con quien no compartimos aulas, pero me terminó guiando en la última etapa de este gran camino, siempre con disposición y paciencia a la hora de resolver mis dudas. A los profesores de Telecomunicaciones, por sus enseñanzas y simpatía al momento de desempeñar su labor. A Don Luis, por siempre estar disponible para ayudar a sus estudiantes, confiando en ellos y en lo que son capaces. A Carlos Medina, profesor del departamento de Ing. Mecánica, por su ayuda en pruebas de tracción, pero sobretodo por su simpatía y buena disposición.

Quiero agradecer a mi misma, por siempre seguir adelante a pesar de todas las adversidades, por nunca bajar los brazos, por siempre tratar de desempeñarme de la mejor manera, por siempre esforzarme un poco más en lo que hago, porque de eso se trata la vida, de siempre ser un 1 % mejor cada día.

*He aquí mi secreto, que no puede ser más simple: sólo con el corazón se puede ver bien; **lo esencial es invisible para los ojos.***

Resumen

En el ámbito de la ingeniería, el uso de sensores ópticos de fiber-optic bundles ha sido fundamental para la obtención de información proveniente de fuentes de luz de manera remota y más accesible, pudiendo calcular parámetros como temperatura, razón de transmitancia, poder total de emisión espectral, emisividad, etc. A pesar de los beneficios del uso de sensores ópticos en fiber-optic bundles, estos también se exponen a entornos adversos, donde se enfrentan a condiciones tales como estrés mecánico y desalineamiento óptico. Como consecuencia directa, los fiber-optic bundles pueden resultar dañados, lo que interfiere en la transmisión, desencadenando en mediciones corruptas.

Un estudio de sensibilidad de fiber-optic bundles VIS-NIR ante situaciones de desalineamiento óptico y estrés mecánico, es valioso para poder interpretar mediciones realizadas en este tipo de condiciones. Es por esto que, se replican dichas condiciones de falla observadas en la industria, pero en laboratorio. Todas las pruebas son realizadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción. Se realizan pruebas de desalineamiento óptico, evaluando pérdidas por uso de conectores, pérdidas por desalineamiento rotacional entre terminales, pérdidas por desalineamiento respecto a una fuentes de luz, y pérdidas al revertir terminales; además de pruebas de estrés mecánico, realizando pruebas de tracción, flexión, y sometimiento a altas temperaturas. De todas estas pruebas, se estudió principalmente la razón de transmitancia a medida que la perturbación aumenta, el poder total de emisión espectral, y el error en el cálculo de temperatura.

De los resultados se destaca la alta sensibilidad de la transmisión frente al uso de conectores, donde las pérdidas en la transmisión son proporcionales al uso de conectores, promediando un 50 % con un conector, y un 70 % con 2 conectores. En la prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz, a los 4° de desviación la transmisión decae al 50 %, y casi en su totalidad a los 10°. En las pruebas de estrés mecánico, la chaqueta protectora de acero que recubre las fibras, cumple la función de protegerlas. Una vez esta es retirada, las fibras al interior resultan dañadas de manera gradual, a medida que el nivel de estrés va en aumento. Esto se ve reflejado en la disminución de la transmisión de luz, donde esta llega al mínimo, significando la ruptura total de las fibras. Con estos valores en conocimiento, es posible crear setups de mediciones más robustos, más preparados ante estas situaciones. Además, es posible corregir mediciones corruptas, en base a los márgenes de error encontrados en las diversas mediciones.

Abstract

In the field of engineering, the use of optical sensors in fiber-optic bundles has been fundamental for obtaining information from light sources in a remote and more accessible way, being able to calculate parameters such as temperature, transmittance ratio, total power of spectral emission, emissivity, etc. Despite the benefits of using optical sensors in fiber-optic bundles, they are also exposed to harsh environments, where they face conditions such as mechanical stress and optical misalignment. As a direct consequence, fiber-optic bundles can become damaged, which interferes with transmission, leading to corrupted measurements.

A study of the sensitivity of VIS-NIR fiber-optic bundles to optical misalignment and mechanical stress is valuable for interpreting measurements under these conditions. For this reason, these failure conditions observed in the industry are replicated, but in the laboratory. All tests are performed at the Faculty of Engineering of the Universidad de Concepción. Optical misalignment tests are performed, evaluating losses due to the use of connectors, losses due to rotational misalignment between terminals, losses with respect to a light source, losses with respect to a second light source, and losses when reversing terminals; in addition to mechanical stress tests, performing tensile tests, bending, and subjection to high temperatures. From all these tests, we mainly studied the transmittance ratio as the perturbation increases, the total spectral emission power, and the error in the temperature calculation.

The results highlight the high sensitivity of the transmission to the use of connectors, where the transmission losses are proportional to the use of connectors, averaging 50 % with one connector and 70 % with two connectors. In the misalignment test with respect to a light source, at 4° of deviation, transmission drops to 50 %, and drops almost completely at 10°. In mechanical stress tests, the protective steel jacket covering the fibers serves to protect them. Once it is removed, the fibers inside are gradually damaged as the stress level increases. This is reflected in the decrease of light transmission, where it reaches a minimum, meaning the total rupture of the fibers. With these values in knowledge, it is possible to create more robust measurement setups, more prepared for these situations. In addition, it is possible to correct corrupted measurements, based on the error margins found in the various measurements.

Índice General

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	IV
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Problema a resolver	2
1.3. Fundamentos teóricos	2
1.3.1. Espectro electromagnético	2
1.3.2. Radiación de cuerpo negro	3
1.3.3. Cálculo de temperatura con el método de 2 longitudes de onda	5
1.3.4. Fibras ópticas	5
1.3.5. Modos de propagación en fibra óptica	7
1.3.6. Pérdidas típicas en fibra óptica	7
1.3.7. Conectores utilizados en fibra óptica	10
1.3.8. Desalineamientos entre fibras ópticas	11
1.4. Trabajos previos	13
1.4.1. Estudios en fiber-optic bundles	13
1.4.2. Uso de fibras ópticas en mediciones de temperatura en la pirometalurgia del cobre	15
1.4.3. Reportes reales de daños en fiber-optic bundles en sensores de alta tem- peratura en pirometalurgia del cobre	15
1.5. Discusión	17
1.6. Metodología a utilizar	18
2. Definición del problema	21
2.1. Introducción	21
2.2. Objetivos	21

	VI
2.2.1. Objetivo general	21
2.2.2. Objetivos específicos	21
2.2.3. Alcances y limitaciones	22
3. Desarrollo	23
3.1. Introducción	23
3.2. Implementos utilizados	23
3.3. Metodología	24
3.3.1. Estudio de transmitancia y cálculo de temperatura	24
3.3.2. Análisis de resultados	26
3.4. Prueba de cálculo experimental de apertura numérica	28
3.4.1. Descripción	28
3.4.2. Resultados	30
3.4.3. Discusión	30
3.5. Pruebas de desalineamiento óptico	30
3.5.1. Pérdidas por uso de conectores	31
3.5.1.1. Descripción	31
3.5.1.2. Resultados	31
3.5.1.3. Discusión	33
3.5.2. Desalineamiento rotacional entre terminales	33
3.5.2.1. Descripción	33
3.5.2.2. Resultados	34
3.5.2.3. Discusión	35
3.5.3. Desalineamiento respecto a una fuente de luz	35
3.5.3.1. Descripción	35
3.5.3.2. Resultados	36
3.5.3.3. Discusión	37
3.5.4. Desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz	38
3.5.4.1. Descripción	38
3.5.4.2. Resultados	39
3.5.4.3. Discusión	40
3.5.5. Revertir terminales	41
3.5.5.1. Descripción	41
3.5.5.2. Resultados	41
3.5.5.3. Discusión	42
3.6. Pruebas de estrés mecánico	42

3.6.1.	Pruebas de tracción	43
3.6.1.1.	Descripción	43
3.6.1.2.	Tracción de chaqueta de fiber-optic bundle	44
3.6.1.3.	Tracción de sonda de fiber-optic bundle	45
3.6.2.	Pruebas de flexión	48
3.6.2.1.	Descripción	48
3.6.2.2.	Resultados	48
3.6.2.3.	Discusión	50
3.6.3.	Pruebas de sometimiento a altas temperaturas	50
3.6.3.1.	Descripción	50
3.6.3.2.	Chaqueta de fiber-optic bundle sometido a altas temperaturas .	51
3.6.3.3.	Conectores de fiber-optic bundle sometido a altas temperaturas	53
4.	Conclusiones	56
4.1.	Conclusión	56
4.2.	Trabajo a futuro	57
A.	ANEXO: Registro completo de pruebas	60
A.0.1.	Prueba de pérdidas por conectores	60
A.0.2.	Prueba de desalineamiento rotacional	61
A.0.3.	Prueba de desalineamiento respecto a una fuente	62
A.0.4.	Prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz	64
A.0.5.	Revertir terminales	65
A.0.6.	Tracción	65
A.0.7.	Flexión	69
A.0.8.	Prueba altas temperaturas	71

Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético. Fuente: [4].	3
1.2. Variación del poder de emisión de cuerpo negro con la longitud de onda para varias temperaturas. Fuente: [5].	4
1.3. Esquema de fibra óptica típica. Fuente: [7].	6
1.4. Representación gráfica de modos de propagación en fibras ópticas. Fuente: [9] . .	7
1.5. Dispersión cromática. Fuente: [10].	8
1.6. Dispersión modal. Fuente: [10].	9
1.7. Dispersión por modo de polarización. Fuente: [10].	9
1.8. Vistas conector SMA905. Fuente: [13].	11
1.9. Acoplamientos para fibras ópticas con conectores SMA y FC/PC. Fuente: [14]. .	11
1.10. Desalineamientos más comunes entre fibras. Fuente: [15].	12
1.11. Desalineamiento rotacional entre fiber-optic bundles de 7 núcleos.	12
1.12. Superposición de áreas de los núcleos en FOB de 7 núcleos, expresado en porcentaje con respecto al ángulo de rotación.	13
1.13. Péridas de acoplamiento por desalineamiento rotacional en FOB de 19 núcleos. Fuente: [16].	14
1.14. Fibra sometida a una curvatura de radio constante. Fuente: [18].	14
1.15. Fiber bundles dañadas. Fuente: [23].	16
1.16. Fiber bundles dañadas y reparadas. Fuente: [23]	17
1.17. Esquema general de set-up de pruebas experimentales.	19

1.18. Diagrama de pruebas realizadas a fiber-optic bundles	19
3.1. Fiber-optic bundles utilizados.	24
3.2. Instrumentos utilizados.	24
3.3. Ejemplo modelación de transmitancia en pruebas.	26
3.4. Modelo de gráfico para presentación de resultados.	28
3.5. Setup de prueba de cálculo experimental de apertura numérica.	29
3.6. Procedimiento medición experimental de apertura numérica de fiber-optic bundle.	29
3.7. Setup de prueba de pérdidas por uso de conectores.	31
3.8. Razón de transmitancia espectral en prueba de pérdidas por conectores en función del número de conectores utilizados.	32
3.9. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de pérdidas por conectores.	32
3.10. Setup prueba de desalineamiento rotacional.	33
3.11. Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento rotacional en función del ángulo de desviación, para los casos de 0°, 20°, 30°, 40° y 60° en sentido horario.	34
3.12. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento rotacional.	34
3.13. Setup de prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz.	36
3.14. Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz en función del ángulo de desviación, para los casos de 0°, 2°, 4°, 6°, 8° y 10° en sentido horario.	36
3.15. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz.	37

3.16. Imágenes tomadas a un microscopio de fiber-optic bundle mientras este transmite luz.	37
3.17. Setup de prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz. . . .	38
3.18. Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz, en función del grado de desalineamiento de ésta, para 0° , 14° y 32° de desviación.	39
3.19. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz.	40
3.20. Setup prueba de revertir terminales.	41
3.21. Error porcentual absoluto del poder de emisión espectral en prueba de revertir terminales para los fiber-optic bundles n° 4, 6, 7, 8 y 10.	42
3.22. Setup prueba de tracción.	43
3.23. Chaqueta de fiber-optic bundle traccionada.	44
3.24. Sonda de fiber-optic bundle en prueba de tracción.	45
3.25. Fuerza y espectros en prueba de tracción.	46
3.26. Razón de transmitancia en prueba de tracción en función de la duración de la prueba, en puntos cruciales.	46
3.27. Resultados de poder total de de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de tracción.	47
3.28. Setup prueba de flexión.	48
3.29. Fiber-optic bundles en prueba de flexión.	49
3.30. Razón de transmitancia en prueba de flexión en distintos niveles de flexión. . . .	49
3.31. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de flexión.	50
3.32. Setup prueba de sometimiento a altas temperaturas.	51

	XI
3.33. Chaqueta de fiber-optic bundle sometida a altas temperaturas.	51
3.34. Conector de fiber-optic bundle sometido a altas temperaturas.	54
3.35. Conectores SMA.	54
3.36. Razón de transmitancia en prueba de conector a 260° en función del tiempo que estuvo expuesto.	54
3.37. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de conector a 260°.	55
A.1. Razón de transmitancia en prueba de pérdidas por conectores en función del número de conectores utilizados.	60
A.2. Resultados de poder de emisión total y error de temperatura calculada en prueba de pérdidas por conectores.	61
A.3. Razón de transmitancia en prueba de desalineamiento rotacional en función del ángulo de desviación, para los casos de 0°, 20°, 30°, 40° y 60° en sentido horario.	61
A.4. Resultados de poder de emisión total y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento rotacional.	62
A.5. Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una fuente en función del ángulo de desviación, para los casos de 0°, 2°, 4°, 6°, 8° y 10° en sentido horario.	62
A.6. Resultados de poder de emisión total y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una fuente.	63
A.7. Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz, en función del grado de desalineamiento de ésta, para 0°, 14° y 32° de desviación.	64
A.8. Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz.	64
A.9. Error porcentual absoluto del poder de emisión espectral en prueba de revertir terminales para los fiber-optic bundles n° 4, 6, 7, 8 y 10.	65

A.10.Fuerza y espectros en prueba de tracción.	66
A.11.Razón de transmitancia en prueba de tracción en función de la duración de la prueba, en puntos cruciales.	66
A.12.Resultados de poder total de de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de tracción.	67
A.13.Fuerza aplicada a FOB 2.	67
A.14.Resultados tracción FOB 2.	68
A.15.Fuerza aplicada a FOB 5.	68
A.16.Resultados tracción FOB 5.	68
A.17.Conector traccionado	69
A.18.Razón de transmitancia en prueba de flexión en distintos niveles de flexión, en FOB n°1	69
A.19.Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de flexión, en FOB n°1	70
A.20.Resultados flexión FOB n°4	70
A.21.Razón de transmitancia en prueba de conector a 260° en función del tiempo que estuvo expuesto.	72
A.22.Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de conector a 260°.	72

Índice de tablas

1.1. Fiber-optic bundles de 1 <i>m</i> utilizados en pruebas.	20
1.2. Fiber-optic bundles de 2 <i>m</i> utilizados en pruebas.	20
3.1. Resultados de cálculo experimental de apertura numérica de cada fiber-optic bundle.	30
3.2. Pérdidas promedio debido a uso de conectores entre fiber-optic bundles y temperatura calculada.	32
3.3. Fuerza máxima de tracción que soportan chaquetas de fiber-optic bundles. . . .	44
3.4. Resultados de fuerza, poder total de emisión espectral, temperatura calculada, y error de temperatura calculada en puntos cruciales de prueba de tracción.	47
3.5. Fiber-optic bundles luego de ser sometido a altas temperaturas a distintas distancias y temperaturas, durante 2 minutos.	52
3.6. Resultados de distintas chaquetas de FOB expuestas a altas temperaturas. . . .	53
A.1. Resultados de prueba de pérdidas por uso de conectores.	60
A.2. Resultados promedio de prueba de pérdidas por uso de conectores.	61
A.3. Resultados obtenidos en prueba de desalineamiento respecto a una fuente. . . .	63
A.4. Resultados obtenidos en prueba de desalineamiento respecto a a una segunda fuente de luz.	65
A.5. Resultados de fuerza, poder total de emisión espectral, temperatura calculada, y error de temperatura calculada en puntos cruciales de prueba de tracción.	67
A.6. Resultados obtenidos en prueba de flexión para algunos puntos, del FOB n°1. . . .	70

A.7. Fiber-optic bundles luego de ser sometido a altas temperaturas a distintas distancias y temperaturas, durante 2 minutos.	71
A.8. Resultados de distintas chaquetas de FOB expuestas a altas temperaturas. . . .	72

Nomenclatura

FO Fibra(s) Óptica(s)

FOB Fiber Optic Bundle

NA Numeric Aperture

1. Introducción

1.1. Contexto

La fibra óptica llegó para revolucionar la industria al ofrecer una tecnología capaz de transmitir luz a grandes distancias, generando un impacto en la ingeniería. Dicha tecnología se basa en la transmisión de luz a través del núcleo, o core, fabricado de materiales como vidrio o sílice dopada, cubierto con un revestimiento, o cladding, de un material con un índice de refracción inferior al del core, como por ejemplo sílice pura, polímeros, entre otros. Gracias a esta diferencia de índice de refracción, ocurre el fenómeno de reflexión interna total, el que permite a la luz viajar a través del núcleo de la fibra sin salir de éste. La luz se puede enviar por distintos modos de propagación, por lo que existen fibras monomodo, donde la luz se propaga en un modo, y las fibras multimodo, donde la luz se propaga en diferentes modos, siendo estas últimas de un mayor diámetro. Además, existen fibras multinúcleo, que tal como lo indica su nombre, tiene múltiples núcleos al interior de un solo buffer [1]. Para este proyecto, se utilizan fibras multimodo y multinúcleo. A lo largo de la sección 1.3 se profundizan todas las características mencionadas de las fibras ópticas.

Por otro lado, los sensores ópticos son dispositivos que funcionan en base a la detección de luz, extrayendo información tal como intensidad, fase, polarización y longitudes de onda. Son resistentes a la mayoría de los agentes químicos y biológicos, pudiendo así trabajar en estos ambientes. Otra ventaja es que pueden ser pequeños y livianos [2]; además, se pueden utilizar de manera remota. Su uso es útil en distintas industrias donde se requiera detección y un posterior procesamiento de información, como por ejemplo en la industria de la pirometalurgia del cobre, donde permiten medir temperatura, emisividad, para así tomar mejores decisiones al momento de la producción de este metal, garantizando una mayor eficiencia en la producción. En la sección 1.4 se habla más a profundidad el tema, explicando el uso de los sensores ópticos de fibra óptica en dicha industria, incluyendo reportes reales de daños a fiber-optic bundles.

1.2. Problema a resolver

Se debe considerar que, al utilizar fibras ópticas para transmitir la luz, que es capturada por los sensores ópticos, puede implicar ciertos riesgos, ya que estas se exponen a ambientes hostiles, y a distintas perturbaciones, tales como tensiones mecánicas, altas temperaturas, vibraciones, etc. que pueden alterar el estado de las fibras ópticas, y por ende, la transmisión. Se encontraron estudios realizados a fibras ópticas, donde estas se expusieron a perturbaciones y se modelaron sus pérdidas, pero principalmente en el ámbito de comunicaciones de datos, por lo que no son tan útiles para aplicaciones tales como cálculo de temperatura, mediante la transmisión de luz.

Es por esto que, en esta Memoria de Título se estudian efectos en la transmisión de luz, y en el cálculo de temperatura bajo estas condiciones, y así su efecto en aplicaciones en la industria, como en la pirometría del cobre.

1.3. Fundamentos teóricos

1.3.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético corresponde al conjunto de todas las frecuencias de radiación electromagnética, las cuales se pueden separar en distintos grupos según su frecuencia/longitud de onda, tal como se ve en la Fig. 1.1. Dentro de estos grupos se encuentra el espectro visible, que tal como lo dice su nombre, es visible por el ojo humano, correspondiente a $\lambda = 400 - 770nm$; también se encuentra la radiación infrarroja (IR), la cual se asocia al calor que emiten los cuerpos, en el rango de $\lambda = 700nm - 1mm$; la radiación ultravioleta (UV), por debajo de la luz visible en el rango de $\lambda = 10 - 400nm$, que posee la suficiente energía para ionizar átomos y moléculas [3]. Para esta Memoria de Título es de interés la banda VIS-NIR, que va desde el visible hasta el infrarrojo cercano, abarcando el rango $\lambda = 400nm - 1,5\mu m$, ya que el peak de emisión a $1500K$, temperatura de interés por la pirometalurgia del cobre, ocurre en la banda VIS-NIR.

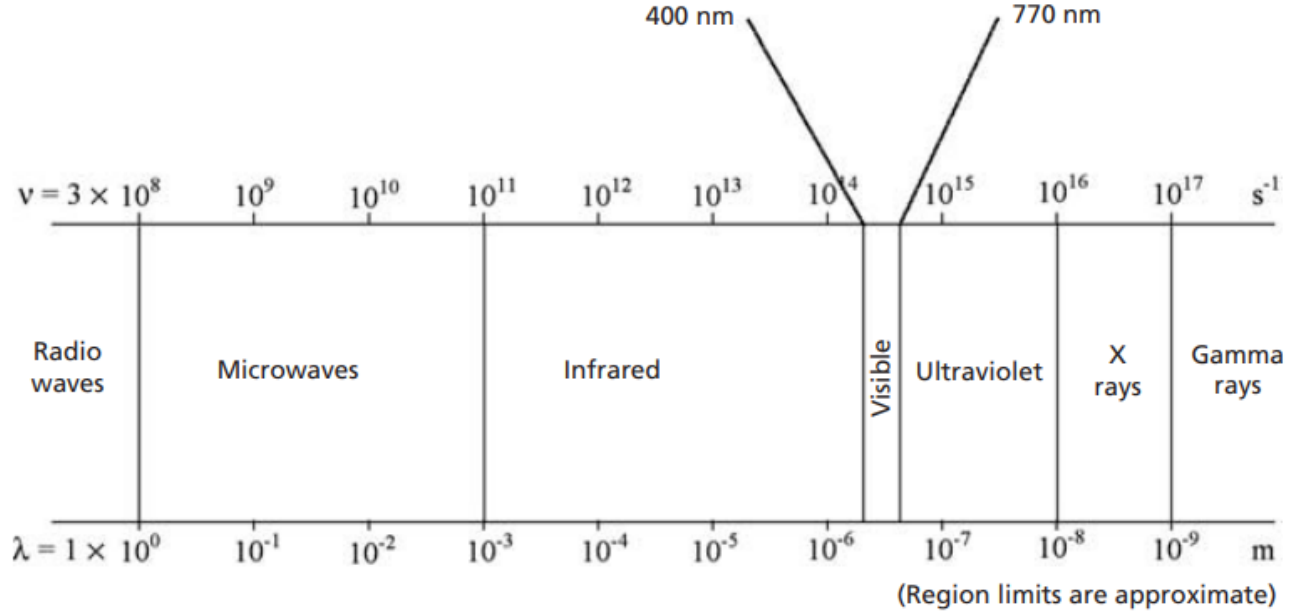


Fig. 1.1: Espectro electromagnético. Fuente: [4].

1.3.2. Radiación de cuerpo negro

A una temperatura sobre $0K$, un cuerpo emite radiación en todas las direcciones, y a distintas longitudes de onda, las cuales dependen del tipo de material del cuerpo y de su superficie [5]. Un cuerpo negro corresponde a un emisor y absorbedor perfecto de la radiación. Este absorbe toda la radiación incidente (a cualquier longitud de onda), y a su vez la emite de manera uniforme en todas las direcciones [5]. Esta se expresa como el poder de emisión de cuerpo negro E_b :

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad W/m^2 \quad (1.1)$$

donde $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ cte. de Stefan-Boltzmann, y T , la temperatura absoluta en K .

Esta expresión es generalizada para todas las longitudes de onda. Sin embargo, la Ley de Plank provee una descripción por longitud de onda del poder de emisión de cuerpo negro $E_{b\lambda}$ [5]:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad W/m^2 \cdot \mu m \quad (1.2)$$

donde $C_1 = 2\pi h c_0^2 = 3.7411 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$, $C_2 = h c_0/k = 1.43878 \times 10^4 \mu m \cdot K$, T la temperatura absoluta en K , λ la longitud de onda de la radiación emitida, $k = 1.38065 \times 10^{-23} J/K$ cte. de Boltzmann. La Fig. 1.2 grafica esta expresión para diferentes temperaturas:

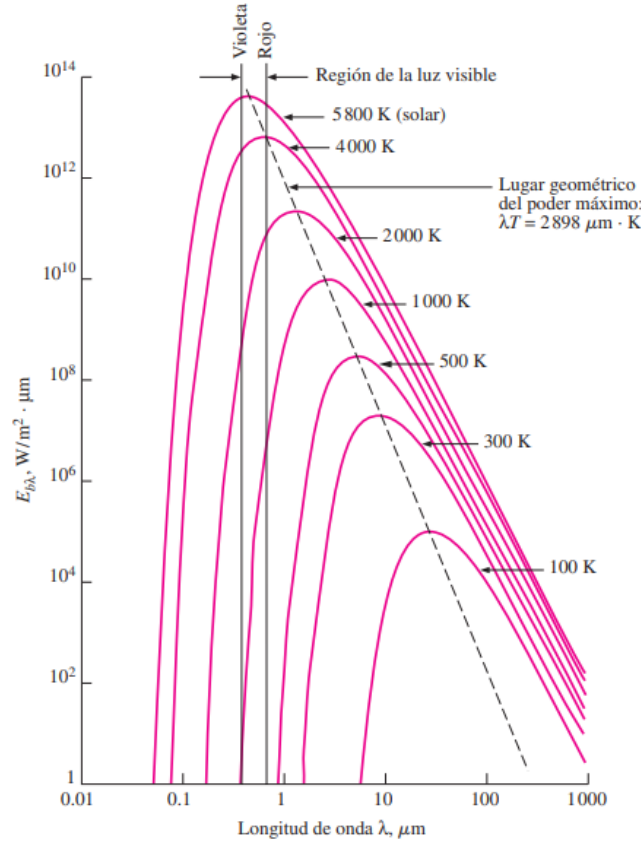


Fig. 1.2: Variación del poder de emisión de cuerpo negro con la longitud de onda para varias temperaturas. Fuente: [5].

En la Fig. 1.2 se visualiza que el peak de emisión a $T = 5800K$ (solar), se encuentra dentro de la región de la luz visible (VIS). La Ley de Desplazamiento de Wien permite calcular la longitud de onda a la que se produce el peak de emisión a una temperatura específica T [5], con la ecuación:

$$(\lambda T)_{\text{poder máximo}} = 2897,8 \quad \mu m \cdot K \quad (1.3)$$

Así, el peak de emisión a $1500K$, temperatura a la cual se trabaja en la pirometalurgia del cobre, se calcula con la ec. (1.3), queda $\lambda = 2897,8/1500 \rightarrow \lambda = 1932 \mu m$, por lo que el peak de emisión a $1500K$ ocurre a $1932 \mu m$ aproximadamente, perteneciente a la banda infrarroja.

El poder total de emisión de cuerpo negro E_b , se obtiene integrando el poder de emisión de cuerpo negro $E_{b\lambda}$ para $0 \leq \lambda < \infty$ [5]:

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad W/m^2 \quad (1.4)$$

Obteniendo así la ec. (1.1) integrando la ec. (1.2) para todas las longitudes de onda. Por otro lado, para una banda de longitudes de onda específicas λ_1 y λ_2 , el poder de emisión de cuerpo negro para dichas longitudes de onda se determina [5]:

$$E_{b,\lambda_1-\lambda_2}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad W/m^2 \quad (1.5)$$

1.3.3. Cálculo de temperatura con el método de 2 longitudes de onda

La emisividad espectral es la relación entre la potencia radiada por un objeto real sobre la potencia de un cuerpo negro, a cierta longitud de onda y temperatura [5], definida:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{E_{real}(\lambda, T)}{E_b(\lambda, T)} \quad (1.6)$$

donde E_{real} es el poder de emisión del objeto real, y E_b es el poder de emisión de cuerpo negro a la misma longitud de onda.

Por otro lado, la intensidad de radiación emitida por un cuerpo genérico se expresa como:

$$E_{gen}(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) E_b(\lambda, T) \quad (1.7)$$

donde,

- $\epsilon(\lambda, T) = 1 \quad \forall \lambda, \forall T$, cuerpo negro
- $\epsilon(\lambda, T) = \text{cte.} \quad \forall \lambda, \forall T$, cuerpo gris

Con estas ecuaciones, y mediante la aproximación de Wien, se puede derivar en una fórmula para el cálculo de la temperatura de un cuerpo genérico, basado en el conocimiento del poder de emisión espectral, y dos longitudes de onda, λ_1 y λ_2 [6]:

$$T = \frac{\frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \left(\frac{I(\lambda_2, T)}{I(\lambda_1, T)} \right) + \ln \left(\frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)} \right) - 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad K \quad (1.8)$$

1.3.4. Fibras ópticas

La fibra óptica es un medio que ha revolucionado la industria, debido a que permite enviar luz, la que se propaga por el núcleo de la fibra óptica. Una fibra óptica típica está conformada

por un núcleo de sílice dopada con algún material como óxido de germanio, flúor, fósforo, entre otros, cubierta por un revestimiento de sílice pura, de índice de refracción (n) menor [7].

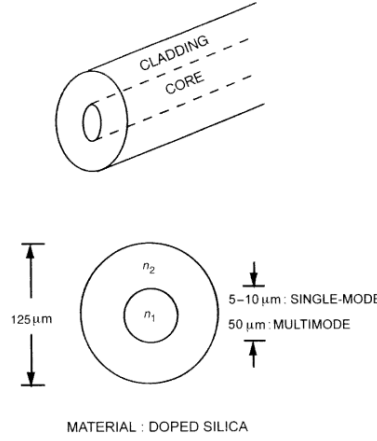


Fig. 1.3: Esquema de fibra óptica típica. Fuente: [7].

La luz viaja a través del núcleo gracias al fenómeno de reflexión interna total, el que ocurre debido a que el índice de refracción del núcleo (n_1) es mayor que el índice de refracción de su revestimiento (n_2), por lo que la luz no escapa del núcleo. La Ley de Snell relaciona el ángulo crítico θ_c , ángulo mínimo de incidencia para que se produzca la reflexión interna total, con los índices de refracción ($n_1 > n_2$) de la siguiente manera:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.9)$$

Por otro lado, la apertura numérica de una fibra óptica se define como el seno del ángulo de aceptación que tiene una fibra óptica, el cual es el ángulo máximo por el cual permite entrar luz al sistema [8]:

$$NA = n \sin(\theta_A) = \frac{r}{\sqrt{r^2 + D^2}} \quad (1.10)$$

donde, n , es el índice de refracción del medio (1 cuando el medio es aire), θ_A , el ángulo máximo de apertura, r , el radio del núcleo de la fibra, D , la distancia desde el eje hasta el límite del revestimiento donde se produce la reflexión interna.

1.3.5. Modos de propagación en fibra óptica

Un modo de propagación en fibra óptica se refiere a un patrón de propagación de la luz al interior de esta, como respuesta a las ecuaciones de Maxwell. Depende de factores como el índice de refracción del núcleo, la longitud de onda de la luz, el diámetro del núcleo, entre otros. Las fibras ópticas pueden ser del tipo monomodo o multimodo. En el primer caso, sólo pueden propagar la luz en el modo fundamental LP₀₁, lo que significa que la luz viaja a lo largo de un solo camino, como se ve en la Fig. 1.4 en el (0,1). Comúnmente, el diámetro del núcleo es pequeño ($8\text{-}10\ \mu\text{m}$). Por otro lado, las fibras multimodo tienen un diámetro del núcleo mayor ($>50\ \mu\text{m}$), lo que permite que varios modos se propaguen simultáneamente.

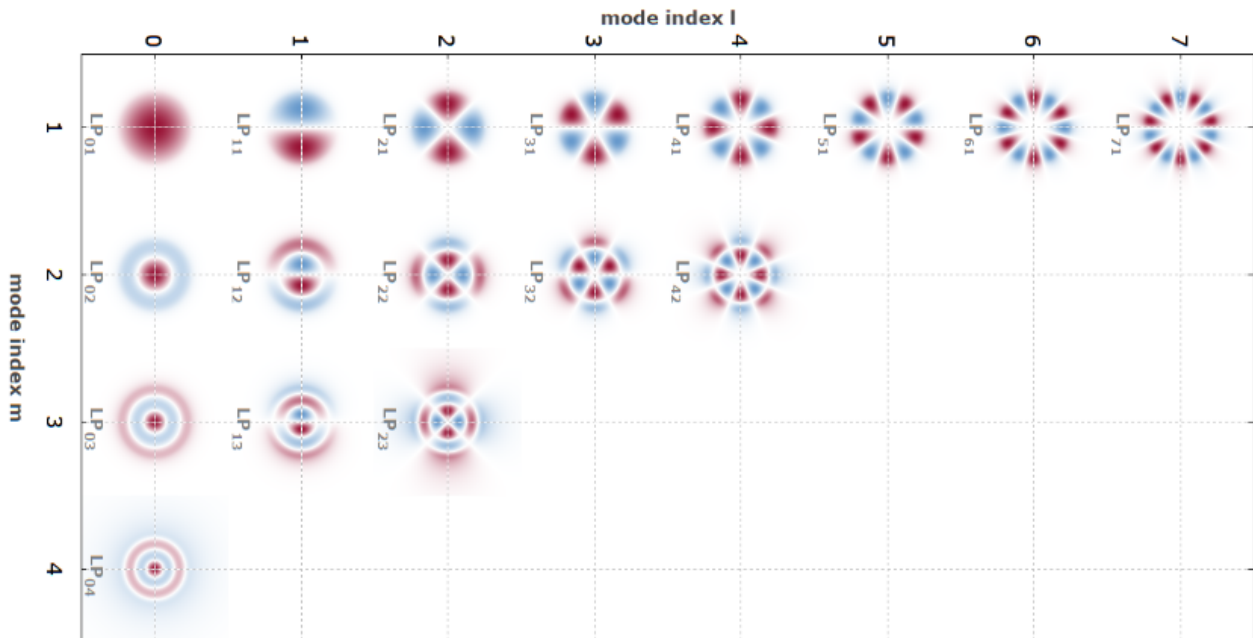


Fig. 1.4: Representación gráfica de modos de propagación en fibras ópticas. Fuente: [9]

1.3.6. Pérdidas típicas en fibra óptica

Cuando se habla de atenuación en fibra óptica, se refiere a pérdidas de señal entre la entrada y la salida. Principalmente se pueden separar en pérdidas intrínsecas y extrínsecas [10]:

Pérdidas Intrínsecas: Es una medida de la pérdida de potencia óptica de la fibra, debido a características inherentes del material de la fibra, su estructura, fenómenos de scattering, dispersión, etc. La atenuación se mide en decibeles:

$$A[dB] = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (1.11)$$

donde P_{in} , es la potencia de entrada, y P_{out} la potencia de salida.

- Absorción del material: La transmisión experimenta atenuación debido al material que está compuesta la fibra óptica. Por ejemplo, la más común está fabricada con sílice fundido, la que está optimizada para la transmisión a $\lambda = 1300 - 1550 \text{ nm}$, por ello, a $\lambda > 2000 \text{ nm}$ la absorción es considerable. En ese caso, se recomienda utilizar una fibra óptica de otro material. La contaminación en la fabricación de la fibra óptica también contribuye a pérdidas, ya que pueden quedar restos de contaminantes, y por ende perturbar la transmisión [10].
- Scattering: Proceso en el cual la potencia (una parte o su totalidad) cambia de modo. Ocurre cuando la luz se encuentra en un índice de refracción distinto en el mismo medio [10]. Esto es debido a variaciones en la densidad del material, defectos de fabricación, fluctuaciones de composición, etc. Se puede presentar Scattering lineal y no lineal [11].
- Dispersión: Distorsión de una señal, limitando el ancho de banda de un punto a otro. Hay de tres tipos, dispersión cromática, dispersión modal y dispersión por modo de polarización.
 - Dispersión cromática: Ocurre cuando las longitudes de onda viajan a distintas velocidades.

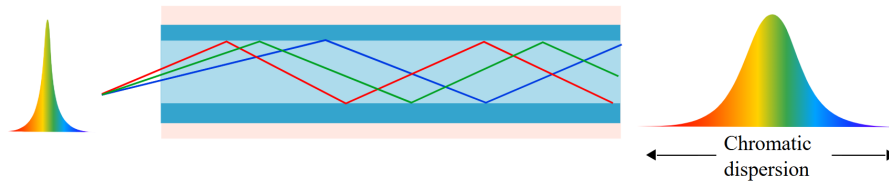


Fig. 1.5: Dispersión cromática. Fuente: [10].

- Dispersión modal: Ocurre en fibras ópticas multimodo, donde los modos se propagan a distintas velocidades, llegando algunos primero que otros, dispersando la señal en el tiempo. Algunos modos viajan en línea recta, mientras que otros rebotan en el límite del núcleo.

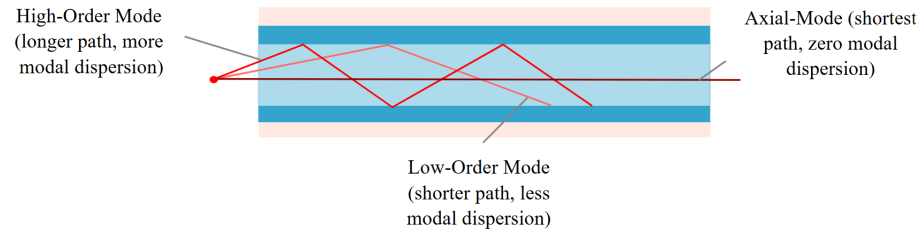


Fig. 1.6: Dispersión modal. Fuente: [10].

- Dispersión por modo de polarización: Ocurre debido a un desperfecto en el núcleo de la fibra. Ambos ejes tienen un índice de refracción ligeramente distinto. Debido a esto, los pulsos sufren ensanchamiento.

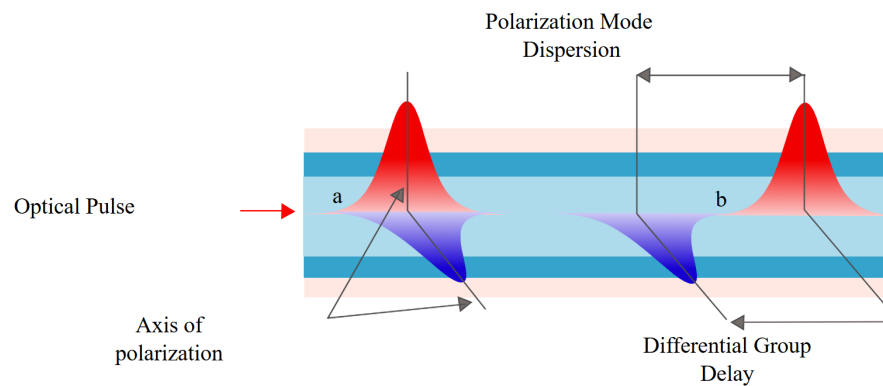


Fig. 1.7: Dispersión por modo de polarización. Fuente: [10].

- Pérdidas por flexión: Ocurre cuando una fibra óptica está bajo flexión. La flexión del tipo macroscópica, ocurre cuando la fibra óptica se flexiona y ciertos modos no se reflejan, causando pérdidas en el cladding. La flexión del tipo microscópica, ocurre cuando el núcleo sufre curvaturas en su superficie, causando reflexiones donde no debería haber.

Pérdidas extrínsecas: Tienen relación con los componentes externos al cable de fibra óptica. Entre estas se destacan las pérdidas por inserción y las pérdidas por retorno.

- Pérdidas por inserción: Pérdida de potencia cuando la luz pasa por algún componente, tal como conector, acoplador, empalme, etc.
- Pérdidas por retorno: Luz se refleja hacia la fuente. Se expresa como la magnitud de la señal reflejada.

Pérdidas totales en fibra óptica: Es la suma de todas las pérdidas. Estas se definen [10]:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas intrínsecas/Atenuación } [dB] &= \text{Coef. máx. de atenuación del cable } [dB/km] \\ &\times \text{Largo del cable } [km] \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas por conectores } [dB] &= N^\circ \text{ de conectores} \\ &\times \text{Margen de pérdida por conectores } [dB] \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas por empalme } [dB] &= N^\circ \text{ de empalmes} \\ &\times \text{Margen de pérdida por empalme } [dB] \end{aligned} \quad (1.14)$$

Queda así una ecuación para pérdidas totales en fibra óptica con la suma de las ec. (1.12), (1.13) y (1.14):

$$\text{Pérdida total } [dB] = \text{Pérdidas intrínsecas} + \text{Pérdidas por conectores} + \text{Pérdidas por empalme} \quad (1.15)$$

1.3.7. Conectores utilizados en fibra óptica

El conector de una fibra óptica es una pieza fundamental, ya que permite la transmisión de luz hacia otras fibras u otros dispositivos. Existen de muchos tipos, pero para las pruebas en esta Memoria de Título se utilizan conectores SMA905 para fibra óptica multimodo y multinúcleo.

Un ejemplo de este es el conector SMA905 de Thorlabs. Este modelo en particular tiene casquillo de acero inoxidable 304 (permite funcionamiento a temperaturas hasta 250°C) y es ideal para fibras ópticas de núcleo grande ($\varnothing 125 - 1580 \text{ } \mu m$) [12]. A continuación, se presentan diagramas en la Fig. 1.8 del conector SMA905 de $\varnothing 850 \text{ } \mu m$:

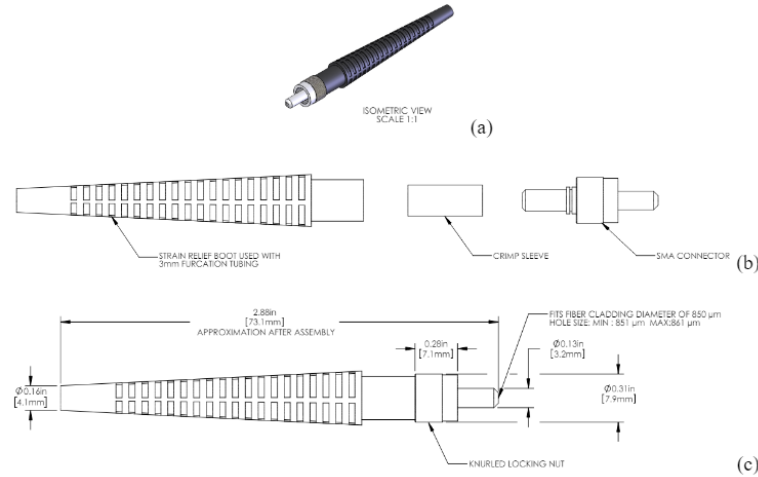


Fig. 1.8: Vistas conector SMA905. Fuente: [13].

(a) Imagen a escala 1:1 (b) Vista despiezada; (c) Vista ensamblada.

Para unir fibras ópticas de conectores SMA905 se utilizan acoplamientos. El proveedor Thorlabs ofrece acoplamientos de fibras SMA a SMA (igualmente contruidos de acero inoxidable 304), compatible con los conectores SMA905, con pérdidas por inserción $<1,5 dB$. El proveedor también ofrece funda de acoplamiento FC/PC (monomodo y multimodo) a SMA (SMA905). Para las pruebas a realizar en esta Memoria de Título se utilizan los primeros.



Fig. 1.9: Acoplamientos para fibras ópticas con conectores SMA y FC/PC. Fuente: [14].

(a) Funda de acoplamiento SMA a SMA compatible con vacío; (b) Funda de acoplamiento FC/PC a SMA.

1.3.8. Desalineamientos entre fibras ópticas

Entre la conexión de fibras ópticas también pueden ocurrir desalineamientos. En la Fig. 1.10 (a) se presenta el desalineamiento lateral, el que ocurre cuando no hay un acople entre los núcleos de ambas fibras ópticas. La separación longitudinal, en la Fig. 1.10 (b) ocurre cuando 2 fibras conectadas no se encuentran en contacto. El último caso corresponde a desalineamiento angular en la Fig. 1.10 (c), que ocurre cuando hay una desviación en la orientación de los ejes de los núcleos:

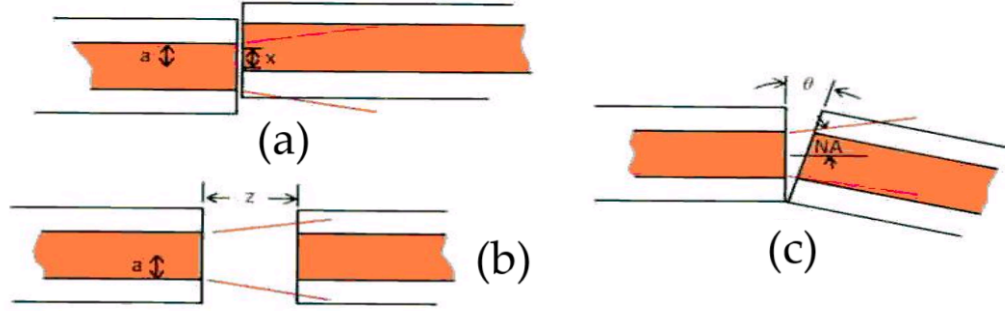


Fig. 1.10: Desalineamientos más comunes entre fibras. Fuente: [15].

(a) Desalineamiento lateral; (b) Separación longitudinal; (c) Desalineamiento angular.

Otro tipo de desalineamiento presente entre FOB es el desalineamiento rotacional. Este ocurre cuando 2 FOB que están conectados, sus núcleos no coinciden entre sí, por lo que la luz no se transmite en su totalidad, presentando pérdidas. Una imagen referencial, de un FOB de 7 núcleos, como los que se utilizan en la parte experimental, se presenta a continuación en la Fig. 1.11, en distintos grados de desalineamiento:

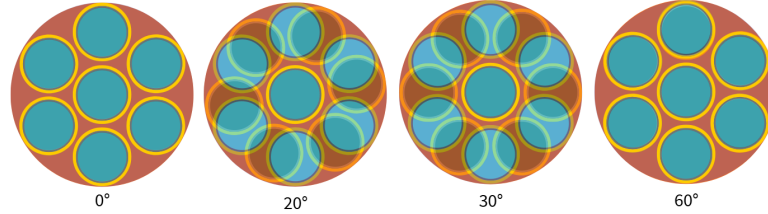


Fig. 1.11: Desalineamiento rotacional entre fiber-optic bundles de 7 núcleos.

Como se aprecia en la Fig. 1.11, cada cierto grado de desviación los núcleos vuelven a coincidir. Para este caso en particular, donde se encuentra un núcleo central y los otros alrededor de éste, se tiene que cada θ° los núcleos vuelven a coincidir:

$$\theta = \frac{360^\circ}{N} \quad (1.16)$$

donde, N es el número de núcleos del FOB que se encuentran en la parte más externa. Así, para el caso de una fibra de 7 núcleos, donde sólo 1 es central, se tiene que $\theta = 360/6 = 60^\circ$, por lo que en los múltiplos de 60° (0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 300° y 360°) los núcleos vuelven a coincidir. La superposición de las áreas de los núcleos se grafica con respecto al ángulo de rotación en la Fig. 1.12:

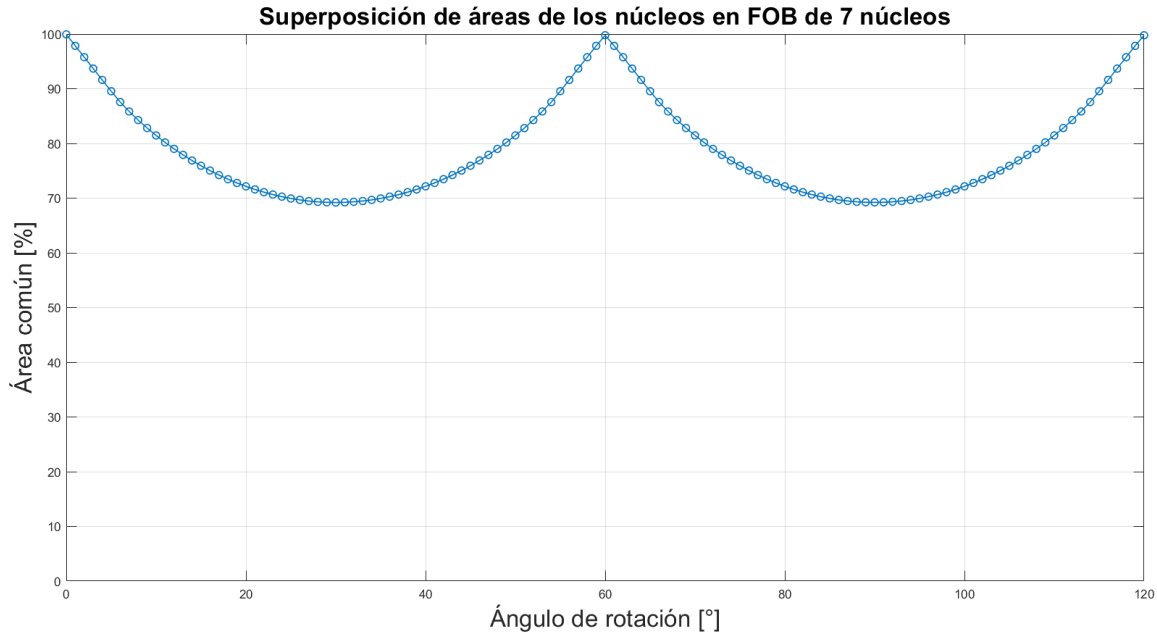


Fig. 1.12: Superposición de áreas de los núcleos en FOB de 7 núcleos, expresado en porcentaje con respecto al ángulo de rotación.

1.4. Trabajos previos

1.4.1. Estudios en fiber-optic bundles

En una publicación sobre desalineamientos entre FOB [16], se realiza la prueba de desalineamiento rotacional para un FOB de 19 núcleos, observando el siguiente comportamiento:

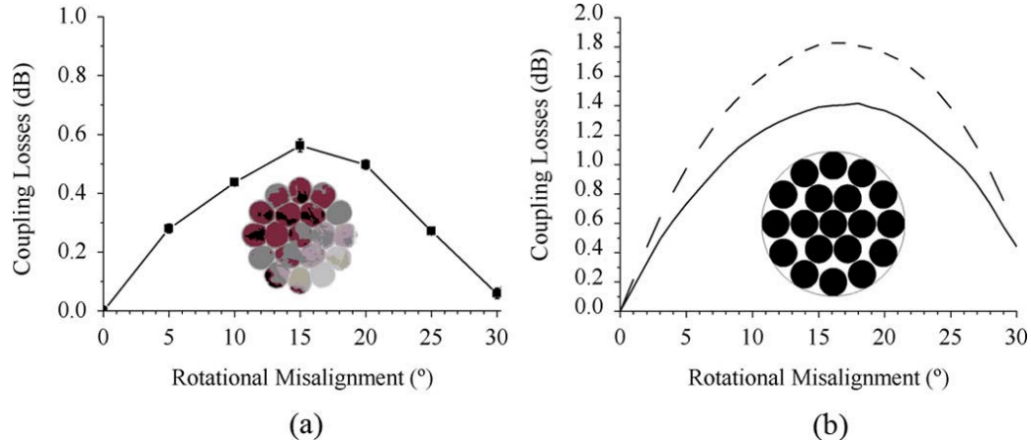


Fig. 1.13: Pérdidas de acoplamiento por desalineamiento rotacional en FOB de 19 núcleos. Fuente: [16].

(a) Mediciones experimentales; (b) Resultados de simulación. Línea discontinua no considera crosstalk, línea continua si.

Usando la ec. (1.16), para el caso de la Fig. 1.13, donde el número de núcleos que se encuentran en la parte más externa es $N = 12$, se cumple que $\theta = 360^\circ/12 = 30^\circ$. Así, para este caso, cada 30° los núcleos vuelven a superponerse.

Por otro lado, en pruebas de estrés mecánico, tales como tracción y fatiga por flexión, cuando se trabaja en modelos de fiber bundle con n fibras, si m fibras se rompen, la carga antes de la fractura se distribuye instantáneamente entre las $n-m$ fibras restantes [17].

Cuando una fibra se flexiona, la mitad está en tensión y la mitad en compresión, donde el estrés se incrementa linealmente desde 0 en el eje neutro hasta el máximo en la superficie [18].

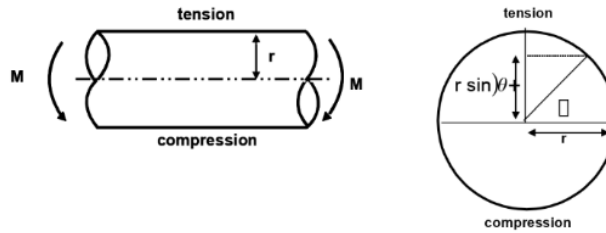


Fig. 1.14: Fibra sometida a una curvatura de radio constante. Fuente: [18].

1.4.2. Uso de fibras ópticas en mediciones de temperatura en la pirometalurgia del cobre

En la industria minera del cobre es fundamental saber a qué temperatura están trabajando los hornos de fundición, ya que cada proceso trabaja a un rango de temperaturas específico, cercano o sobre los 1000°C, tal como el proceso de fundición, el que ocurre a 1200°C [19]. Para saber a qué temperaturas se está trabajando se utiliza un instrumento llamado termocupla o termopar, el cual es un transductor, dispositivo que transforma una señal de entrada en una de salida, en este caso un sensor que genera un cambio en la tensión ante un cambio de temperatura [19]. El instrumento está formado con la unión de dos metales diferentes unidos en un extremo (unión caliente) donde se aplica la temperatura que se desea medir, mientras que por el otro lado ambas puntas de los hilos se encuentran abiertas (unión fría) [20]. Las termocuplas son consideradas instrumentos de sacrificio ya que las reacciones químicas de las fundiciones las dañan.

Otro instrumento de monitoreo de temperatura son los sensores de fibra óptica. Su uso en mediciones de temperatura en fundiciones se debe a que permiten realizar mediciones continuas y sin contacto. Los sensores de temperatura de fibra óptica además están formados de un material dieléctrico, lo que los hace capaces de trabajar en entornos adversos y corrosivos [21].

1.4.3. Reportes reales de daños en fiber-optic bundles en sensores de alta temperatura en pirometalurgia del cobre

Debido a manipulaciones indebidas y temperaturas excesivas, es que los FOB pueden presentar daños, y por ende, transmitir de manera incorrecta, o derechamente no hacerlo. Esto último ocurre cuando un FOB sufre una falla catastrófica, o en palabras simples, cuando se rompe completamente.

En la empresa RS2M (Radiometric Sensing Solutions for Mining) se obtienen datos mediante fiber-optic bundles y componentes de circuitos ópticos, capturando la información espectral emitida en procesos metalúrgicos, para un posterior análisis de la información [22]. Este proceso es realizado tanto en horno del tipo flash y de baño.

Las sondas de FOB son introducidas en las cercanías donde ocurre la fusión. Para la toma de datos se utilizan sondas de 2-3 metros, llamados FOB de sacrificio, donde el terminal que apunta

hacia el baño de fundición es del tipo SMA (dicho conector soporta temperaturas cercanas a los 200° [12]), mientras que por el otro extremo se conecta mediante un conector FC/PC o SMA a otra sonda, la cual es más extensa y va conectada al resto del equipo de medición.

Los FOB de sacrificio son los que más resultan dañados, debido al ambiente en que están expuestos, temperaturas excesivas y su manipulación indebida. Algunos reportes de daños presentados por RS2M se encuentran a continuación en la Fig. 1.15 y Fig. 1.16:

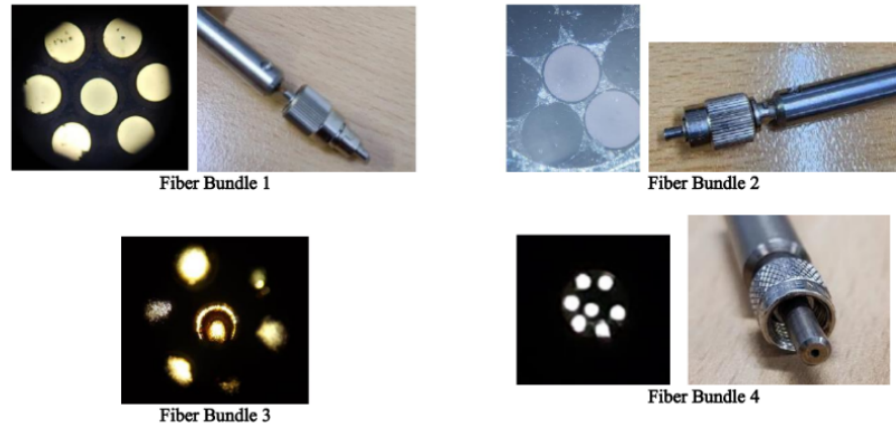


Fig. 1.15: Fiber bundles dañadas. Fuente: [23].

Fiber Bundles dañadas: fibras de sacrificio de un largo de 3.1 m y 7 núcleos. Fiber Bundle 1 sufre ruptura en terminal FC/PC debido a un golpe; 7 núcleos quedan a la vista, pero sin daños. Fiber Bundle 2 no queda estable terminal FC/PC luego de rearmarse, pierde 5 núcleos. Fiber Bundle 3 se expone a temperaturas de $200-300^{\circ}$ y núcleos quedan obstruidos con material solidificado. En el Fiber Bundle 4 los 7 núcleos se separan del terminal y se adentran en él (sin daños), luego de traccionar el terminal [23].

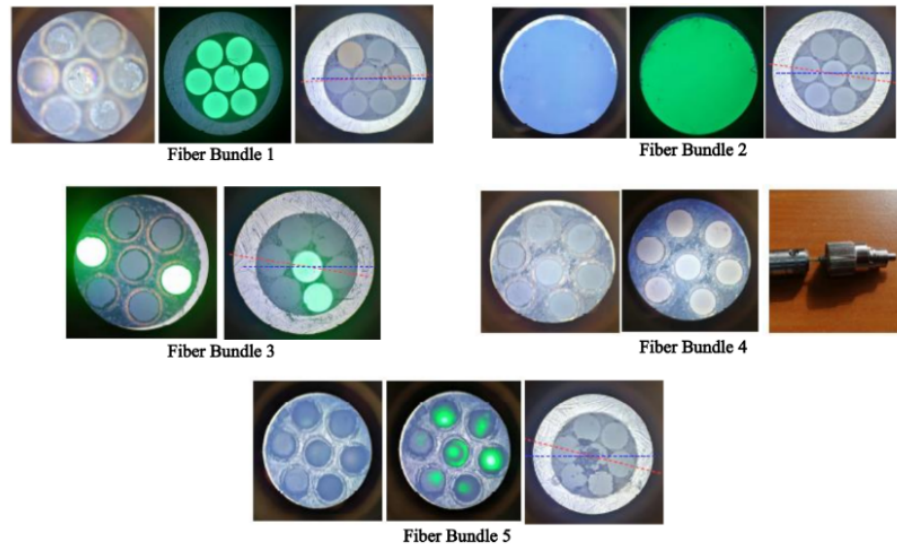


Fig. 1.16: Fiber bundles dañadas y reparadas. Fuente: [23]

Fiber Bundles dañadas y reparadas: fibras de sacrificio de un largo de 2.0 m y 7 núcleos. Fiber Bundle 1 con terminal FC/PC con fractura interna y ángulo de desviación horizontal -3.26° , terminal SMA quemado; como solución, se rearma terminal SMA y se pule terminal FC/PC. Fiber Bundle 2 con terminal FC/PC desviado 8.86° , conector SMA completamente arrancado, fibras transmiten bien; como solución se rehace conector SMA. Fiber Bundle 3 con conector FC/PC con 5 núcleos cortados y desviado 9.17° , conector SMA con suciedad y quemado, y sólo 2 fibras transmiten luz, las otras 2 están rotas; como diagnóstico se tiene que se desconoce punto de quiebre a lo largo del fiber bundle, con alta probabilidad que sea en conector FC/PC. Fiber Bundle 4 con conector FC/PC quebrado mecánicamente, y conector SMA ligeramente dañado; como solución se reemplaza conector FC/PC. Fiber Bundle 5 en conector FC/PC tiene núcleo central picado y está desviado 14.19° , conector SMA con daño superficial de micopicaduras en pulido, fibras hacia el interior; solución en reemplazar ambos conectores [23].

1.5. Discusión

Las mediciones de temperatura y la transmisión de luz en los procesos en la pirometalurgia del cobre son de difícil obtención, teniendo que sacrificar implementos constantemente, tales como termocuplas y fibras de sacrificio, ya que se exponen a altas temperaturas, condiciones del terreno, manipulaciones indebidas por parte de los operadores, etc. A pesar de ello, la obtención de datos mediante el uso de sensores optoelectrónicos en fiber-optic bundles es bastante útil y

eficiente, ya que la información se transmite mediante luz, de manera continua y sin contacto.

Las fibras ópticas también sufren pérdidas típicas, debido al material del cual están fabricadas, a la distorsión que sufre la luz en su viaje, y también se debe considerar las pérdidas debido a conectores. En los sistemas de medición de temperatura con fiber-optic bundles en fundiciones, es fundamental el uso de conectores que sean capaces de soportar temperaturas altas. En este caso, el conector del tipo SMA905, fabricado con acero inoxidable 304, que soporta temperaturas cercanas a los 200° [12]. A pesar de tomar precaución en su uso, como consecuencia de la exposición a dichas temperaturas, es que el pegamento interno de este se puede debilitar, dejando residuos adheridos a él, contaminando la transmisión. De los reportes de fiber bundles dañados, se concluye principalmente que los conectores resultan con daños debidos a golpes o suciedad, experimentando desalineamiento óptico y pérdidas de transmisión en algunos núcleos del fiber bundle, o en casos más graves, en el fiber bundle completo.

Por esto, es importante realizar un estudio de sensibilidad de un sistema de medición de temperatura con fiber-optic bundles VIS-NIR bajo condiciones de estrés mecánico, tales como tracción, flexión, exposición a altas temperaturas, y desalineamiento óptico. De este modo, se podrá entender cómo varía la transmisión según el grado de estrés o desalineamiento, identificando niveles significativos de distorsión en la transmisión, y el punto de pérdida total de ésta. Con esto, se puede asegurar que futuros diseños de sensores de FOB sean más robustos, y además poder determinar causas de fallas basado en la perturbación de la transmisión, y así derivar medidas correctivas para sistemas de FOB dañados.

1.6. Metodología a utilizar

Tras visitas a laboratorios de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica, se verifican implementos disponibles para poder proceder con el diseño e implementación de los setup. A continuación, en la Fig. 1.17 se presenta un esquema de setup general para todas las pruebas, en donde el fiber-optic bundle se somete a experimentación, tanto de estrés mecánico como desalineamiento óptico. El FOB por un lado va conectado al espectrómetro, y éste al PC, y por otro lado a la fuente de luz.

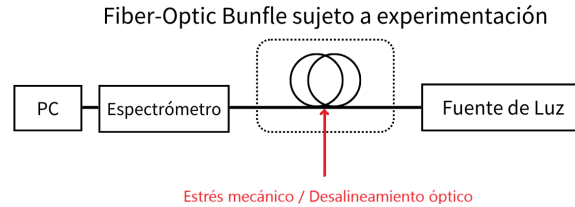


Fig. 1.17: Esquema general de set-up de pruebas experimentales.

Las pruebas realizadas siguieron el orden de la Fig. 1.18. Primero, a todos los FOB se les calculó la apertura numérica. Luego, se realizaron las pruebas de desalineamiento óptico: i) pérdidas por conectores, ii) desalineamiento rotacional entre terminales, iii) desalineamiento respecto a una fuente de luz, iv) desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz, v) revertir terminales. Por último, y con el objetivo de reutilizar los FOB, ya que en las pruebas de desalineamiento óptico no sufren daños, se procede con las pruebas de estrés mecánico: i) tracción, ii) flexión, iii) sometimiento a altas temperaturas.

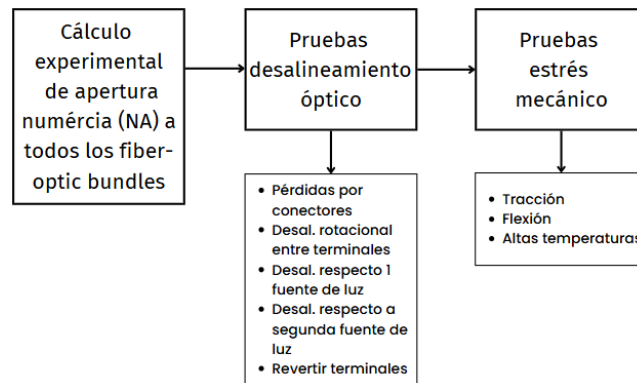


Fig. 1.18: Diagrama de pruebas realizadas a fiber-optic bundles

En total se contó con 20 fiber-optic bundles. 10 unidades de 1 m, y 10 de 2 m, cada uno identificado con un número del 1 al 10, según etiqueta de fábrica. A continuación, en la Tabla 1.1 y Tabla 1.2 se detallan las unidades utilizadas en cada prueba.

Tabla 1.1: Fiber-optic bundles de 1 *m* utilizados en pruebas.

N° FOB (1 m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pérdidas por conector	x		x		x					
Desalineamiento rotacional	x	x								
Desalineamiento respecto una fuente							x			
Desalineamiento respecto una segunda fuente								x		
Revertir terminales				x		x	x	x		x
Tracción										
Flexión	x	x	x	x	x					
Altas temperaturas					x	x	x	x	x	x

Tabla 1.2: Fiber-optic bundles de 2 *m* utilizados en pruebas.

N° FOB (2 m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pérdidas por conector		x		x		x				
Desalineamiento rotacional										
Desalineamiento respecto una fuente										
Desalineamiento respecto una segunda fuente										
Revertir terminales										
Tracción	x	x	x	x	x	x	x			
Flexión										
Altas temperaturas						x	x	x	x	x

2. Definición del problema

2.1. Introducción

En los últimos años de la industria metalúrgica se ha implementado el uso de sensores ópticos de fibras ópticas para la caracterización del proceso y medición de temperatura, como una alternativa para disminuir el uso de termocuplas (herramientas de corta vida útil).

A pesar de ser beneficioso, estos sensores también se exponen a daños físicos, ya sea por el ambiente al que se exponen (altas temperaturas, entorno contaminado), como también manipulaciones por parte de los operadores, resultando dañadas. En este proyecto se busca estudiar dichas perturbaciones a las que se enfrentan los fiber-optic bundles en la industria, pudiendo así cuantificar y relacionar daños físicos con la transmisión y cálculo de temperatura.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Realizar un estudio de sensibilidad de fiber-optic bundles VIS-NIR frente a estrés mecánico, en pruebas de flexión, tracción y exposición a altas temperaturas, y desalineamientos ópticos en sus conectores y respecto a fuentes de luz. Dichos estudios son realizados en laboratorio, replicando condiciones de falla observadas en la industria.

2.2.2. Objetivos específicos

1. Modelación de la transmitancia y medición de temperatura en fiber-optic bundles en condiciones de estrés mecánico y desalineamiento óptico.
2. Diseño e implementación de un setup para pruebas experimentales con fiber-optic bundles.

3. Realización de pruebas experimentales de flexión, tracción, exposición a altas temperaturas y desalineamiento óptico para caracterización de sensibilidad en fiber-optic bundles.
4. Análisis de resultados obtenidos experimentalmente y contraste con modelos teóricos.

2.2.3. Alcances y limitaciones

Las pruebas son realizadas con fiber-optic bundles VIS-NIR de un tamaño de 1 y 2 m (10 de cada uno, facilitados por la empresa RS2M), donde el diseño del setup y de la prueba se basa en lo observado en la industria de fundición del cobre, pero limitado a capacidades de laboratorio. Las pruebas de desalineamiento óptico son realizadas antes que las pruebas de estrés mecánico, ya que los fiber-optic bundles utilizados son los mismos, pero en las primeras pruebas no sufren daños, pudiendo reutilizarse para las segundas pruebas.

Para las mediciones se utiliza una lámpara estabilizadora de calibración modelo Thorlabs SLS202L/M (1900 K) como fuente de luz, en conjunto con un espectrómetro Thorlabs CCS175, instrumento imprescindible para almacenar los datos en computador. En las pruebas de tracción se utiliza una máquina de tracción presente en el Departamento de Ingeniería Mecánica, la cual es facilitada según disponibilidad. En las pruebas de flexión, de sometimiento a altas temperaturas y de desalineamiento óptico, se utilizan instrumentos a disposición en el laboratorio de SP&R en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, tales como mechero (conectado por gas de cañería), prensa manual de tornillo, y otros instrumentos ópticos. En la prueba de sometimiento a altas temperaturas, conectores SMA-SMA no se pueden quemar por separado.

3. Desarrollo

3.1. Introducción

A continuación, se presentan detalles de lo realizado durante el proyecto en base a lo mencionado en los objetivos de esta Memoria de Título. Estas pruebas son realizadas para investigar el comportamiento de los fiber-optic bundles frente a estrés mecánico y desalineamiento óptico, condiciones vistas en fundiciones industriales de cobre. Aplicando tracción, flexión y una exposición a altas temperaturas, se busca replicar el entorno exigente y adverso al que se enfrentan los fiber-optic bundles en dicho escenario. Además, las pruebas de desalineamiento óptico mediante la manipulación de las fuentes de luz y ajuste de los conectores se realizan con el fin de evaluar el impacto de estas variables en la eficiencia de la transmisión.

Los resultados de este proyecto no solo contribuirán a una mejor comprensión del comportamiento de la transmisión y la durabilidad de los fiber-optic bundles, sino que también proporcionarán información valiosa para mejorar su diseño y uso en aplicaciones industriales.

3.2. Implementos utilizados

El implemento principal de este proyecto son los fiber-optic bundles. Se utilizaron 20 del proveedor NVOOptic, de los cuales 10 son de 1 m , y 10 de 2 m , para las diversas pruebas. Estos se identificaron con números del 1 al 10 en cada caso. De aquí en adelante, cuando se mencione "*FOB N*", se refiere a fiber-optic bundle n° N , ya sea de 1 o 2 m , según la prueba. Estos son de 7 núcleos y 200 μm de diámetro de cada núcleo, con una apertura numérica de 0.22 según el fabricante, con terminal SMA905 round (circular). Está compuesto principalmente por una chaqueta protectora de acero, una sonda (poliamida) de color amarillo, que protege las fibras, y las 7 fibras (sílice dopada con flúor). En la Fig. 3.1 (a) se encuentra una imagen de un FOB con sus componentes etiquetados.

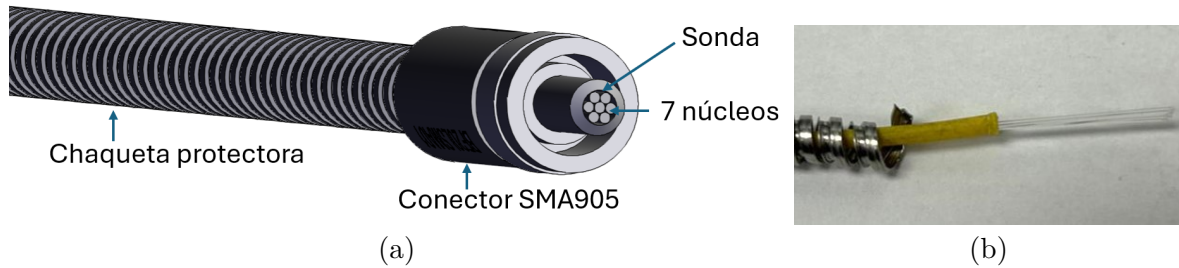


Fig. 3.1: Fiber-optic bundles utilizados.

(a) Esquema de fiber-optic bundle detallando sus componentes; (b) Fiber-optic bundle real.

Para medir la luz transmitida por los FOB, se utilizó el espectrómetro Thorlabs CCS175, una lámpara calibradora Thorlabs SLS202L/M ($T^\circ = 1900\text{ K}$) como fuente de luz, y una lámpara de Tungsteno QTH 63350 a una potencia de 175 W ($T^\circ \sim 1990\text{ K}$). Para tomar las mediciones de los espectros de intensidad de luz, se utilizó el software ThorSpectra (propio del espectrómetro), y para analizar los resultados se utilizó MATLAB.

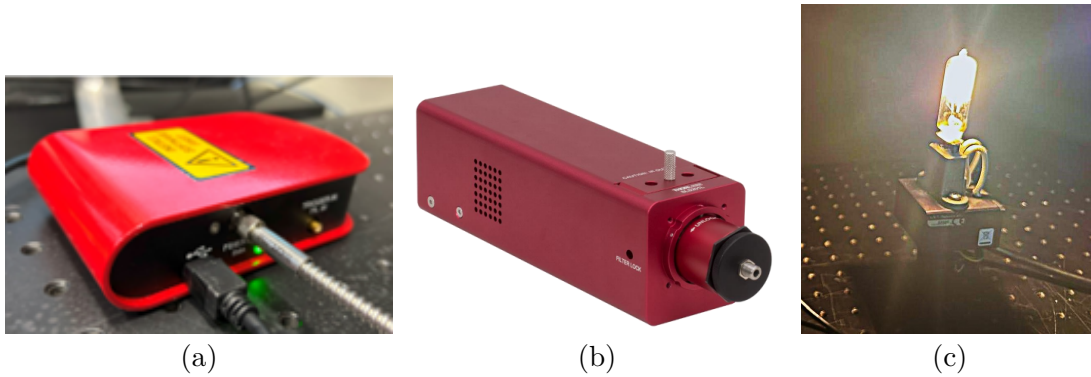


Fig. 3.2: Instrumentos utilizados.

(a) Espectrómetro Thorlabs CSS175; (b) Lámpara Thorlabs SLS202L/M; (c) Lámpara Tungsteno QTH 63350.

3.3. Metodología

3.3.1. Estudio de transmitancia y cálculo de temperatura

Para todas las pruebas realizadas, se busca verificar variación en la transmisión y en el cálculo de temperatura, a medida que la perturbación (desalineamiento o estrés) en el fiber-optic bundle va en aumento. En cada caso, se busca modelar estas variaciones en una expresión.

La expresión para modelar la transmisión nace de un modelo físico de la transmisión de la luz, donde el espectro de intensidad lumínica transmitido se modela como, la transmisión del bundle (Tx_{bundle}) multiplicado por el espectro de intensidad lumínica de la lámpara (E_{lamp}), quedando el espectro de intensidad lumínica final $E(\lambda)$, en función de λ :

$$E(\lambda) = Tx_{bundle}(\lambda) \cdot E_{lamp}(\lambda) \quad (3.1)$$

Al inicio de cada prueba, se tiene un espectro de intensidad lumínica inicial sin perturbaciones Tx_0 :

$$E_0(\lambda) = Tx_0(\lambda) \cdot E_{lamp}(\lambda) \quad (3.2)$$

Y a medida que se va realizando la prueba, el FOB perturbado tiene una transmisión final Tx_f . Queda así el espectro de intensidad lumínica final:

$$E_f(\lambda) = Tx_f(\lambda) \cdot E_{lamp}(\lambda) \quad (3.3)$$

Al dividir la expresión 3.3 sobre 3.2, simplificando la transmisión de la lámpara (presente en ambas expresiones), se obtiene la expresión:

$$\frac{E_f(\lambda)}{E_0(\lambda)} = \frac{Tx_f(\lambda)}{Tx_0(\lambda)} \quad (3.4)$$

Denominada de aquí en adelante razón de transmitancia espectral. Esta expresión cuantifica la razón de cambio de transmitancia a cada longitud de onda λ , pudiendo así estudiar la variación de transmisión a medida que la perturbación aumenta. Las expresiones generales para los 2 tipos de pruebas realizadas son:

- Estudio de pruebas Desalineamiento Óptico, con Tx_D transmisión del fiber-optic bundle desalineado, y Tx_0 transmisión original o sin desalineamiento:

$$\frac{E_f(\lambda)}{E_0(\lambda)} = \frac{Tx_D(\lambda)}{Tx_0(\lambda)} \quad (3.5)$$

- Estudio de pruebas de Estrés Mecánico, con Tx_E transmisión del fiber-optic bundle bajo estrés mecánico, y Tx_0 transmisión sin daño:

$$\frac{E_f(\lambda)}{E_0(\lambda)} = \frac{Tx_E(\lambda)}{Tx_0(\lambda)} \quad (3.6)$$

La Fig. 3.3 muestra un ejemplo de gráfica de razón de transmitancia espectral para 3 niveles de perturbación:

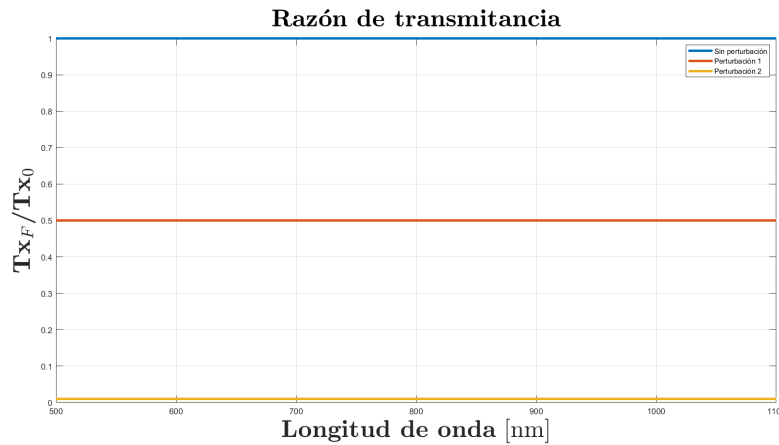


Fig. 3.3: Ejemplo modelación de transmitancia en pruebas.

Para el cálculo de temperatura se utiliza el método de las 2 longitudes de onda, utilizando la ec. (1.8), y seleccionando el par de longitudes de onda $\lambda_1 = 600nm$ y $\lambda_2 = 700nm$ en todas las pruebas, para todas las mediciones. Este par se escoge debido a que la diferencia de potencia entre estas longitudes de onda ($\lambda_2 - \lambda_1$) es positiva para todas las mediciones, asegurando así una temperatura calculada mayor a 0.

3.3.2. Análisis de resultados

Luego de haber realizado las pruebas experimentales para cada caso, y habiendo recolectado una cantidad de datos suficiente, se procede al análisis de los espectros extraídos durante las pruebas.

Los espectros seleccionados para cada prueba dependen de la metodología de cada una. Para las pruebas de desalineamiento óptico, cada vez que el fiber-optic bundle se desvió, se guardó información del espectro, por lo que al momento de realizar el análisis, este se hizo para todas las mediciones. Por otro lado, para las pruebas de estrés mecánico, se tomaron 15 muestras/segundo, obteniendo una cantidad de archivos elevada, por lo que, para el análisis se seleccionaron archivos donde la transmisión se vio afectada, producto de un cambio en el nivel de estrés.

La información fue tomada por el software ThorSpectra, entregando una curva (E_{bruto})

donde el eje x se encuentran las longitudes de onda (μm) y en el eje y la intensidad lumínica normalizada en cuentas digitales ($c.d/(2^{16} - 1)$). Esta información luego es calibrada (E_{calib}) mediante la función de transferencia $H(\lambda)$, determinada para el espectrómetro y la lámpara estabilizadora de calibración. Así, se utiliza la ec. (3.7) para calibrar los espectros:

$$E_{calib} = H(\lambda) \frac{E_{bruto}}{t_i \cdot A_e \cdot D\lambda} \cdot 1 \times 10^{-9} \cdot 1 \times 10^{-4} \cdot 1 \times 10^3 \quad mW/cm^2 \cdot nm \quad (3.7)$$

donde, E_{calib} es el espectro calibrado en $mW/cm^2 \cdot nm$, $H(\lambda)$ la función de transferencia calculada en base a la Ley de Planck, de la ec. (1.1), E_{bruto} , un espectro obtenido por el software ThorSpectra en $c.d/(2^{16} - 1)$, t_i el tiempo de integración en el que se tomaron las muestras, A_e el área de recolección del fiber-optic bundle, y $D\lambda$ dispersión por longitud de onda del espectrómetro.

El espectro calibrado E_{calib} se integra, obteniendo el poder total de emisión espectral, $E_b(T)$, presentado en la ec. (1.4), en unidades de potencia sobre área mW/cm^2 , entre las longitudes de onda $\lambda_1 = 500nm$ y $\lambda_2 = 1100nm$. Esto permite cuantificar la intensidad de la señal de cada medición, y por ende, permite calcular las pérdidas de potencia a medida que el fiber-optic bundle se ve perturbado.

Para la prueba de desalineamiento óptico de revertir los terminales, dado que se utilizan distintos FOB, cada uno con una caracterísitca de transmisión propia, se cuantifican las diferencias con el error relativo $\Delta E(\lambda)$, donde $E_{EL}(\lambda)$ es el espectro referencial del tramo Espectrómetro-Lámpara y $E_{LE}(\lambda)$ el inverso:

$$\Delta E(\lambda) = \frac{|E_{EL}(\lambda) - E_{LE}(\lambda)|}{E_{EL}(\lambda)} \cdot 100 \% \quad (3.8)$$

Por otro lado, con respecto al cálculo de temperatura, ya habiendo calculado las temperaturas en cada medición, mediante el método de 2 longitudes de onda, se calcula el error porcentual absoluto de temperatura, tomando como referencia la temperatura de la primera medición, o de la medición sin perturbación:

$$\Delta T = \frac{abs(T_{calculada} - T_{referencia})}{T_{referencia}} \longrightarrow \Delta T [\%] = \frac{abs(T_{calculada} - T_{referencia})}{T_{referencia}} \cdot 100 \% \quad (3.9)$$

Finalmente, los valores de poder de emisión total espectral $E_b(T)$ [mW/cm^2], y de error porcentual absoluto de temperatura ΔT [%], se presentan entrelazados en un mismo gráfico,

donde en el eje y izquierdo se encuentra $E_b(T)$ [mW/cm^2], y en el eje y derecho ΔT [%]. En tanto en el eje x se encuentra el nivel de desalineamiento o estrés.

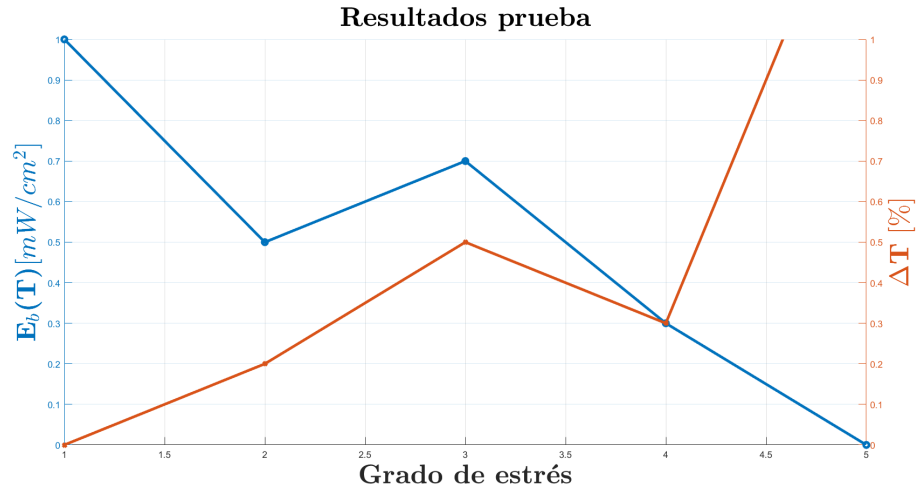


Fig. 3.4: Modelo de gráfico para presentación de resultados.

3.4. Prueba de cálculo experimental de apertura numérica

3.4.1. Descripción

Se busca verificar que el valor de apertura numérica (NA) ofrecida por el fabricante, dentro de los márgenes 0.22 ± 0.02 , coincide con lo calculado de manera práctica.

Para esto, se necesita ubicar un fiber-optic bundle que transmita luz y la refleje sobre una superficie cuadriculada a una distancia D . De la circunferencia reflejada se calcula el radio r . En esta prueba se utilizan todos los FOB disponibles (10 de 1 m y 10 de 2 m).

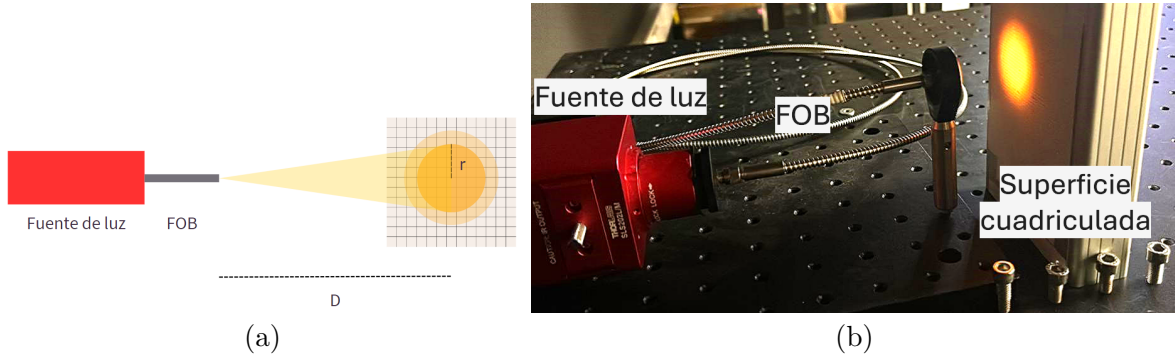


Fig. 3.5: Setup de prueba de cálculo experimental de apertura numérica.

(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

Se ubica un FOB a una distancia D de una superficie cuadrículada (de 2 mm), usando $D_1 = 10.4\text{ mm}$, $D_2 = 43.2\text{ mm}$ y $D_3 = 69.4\text{ mm}$. Se toma una fotografía de cada circunferencia (de radio r) reflejada, para después calcular el valor de r en el software ImageJ, definiendo una escala en base a la cuadrícula (*Set Scale* $\rightarrow$ n° de píxeles de una arista = 2 mm). Las imágenes fueron tomadas en perspectiva, por lo que en algunas mediciones se encontró un error $< 0.2\text{ mm}$ por cada 2 mm medidos. Luego, se verifica si la circunferencia se ve a simple vista, tal como en la Fig. 3.6 (b). En este caso, en la imagen se ve a simple vista la circunferencia más predominante, por lo que se procede a medir el diámetro de esta. En caso de que no sea visible a simple vista (se vea difusa), se procede a cambiar los parámetros de brillo/contraste, y a separar la imagen en RGB, como en la Fig. 3.6 (c), donde después de aplicar cambios en dichos parámetros se procede a medir el diámetro de la circunferencia.

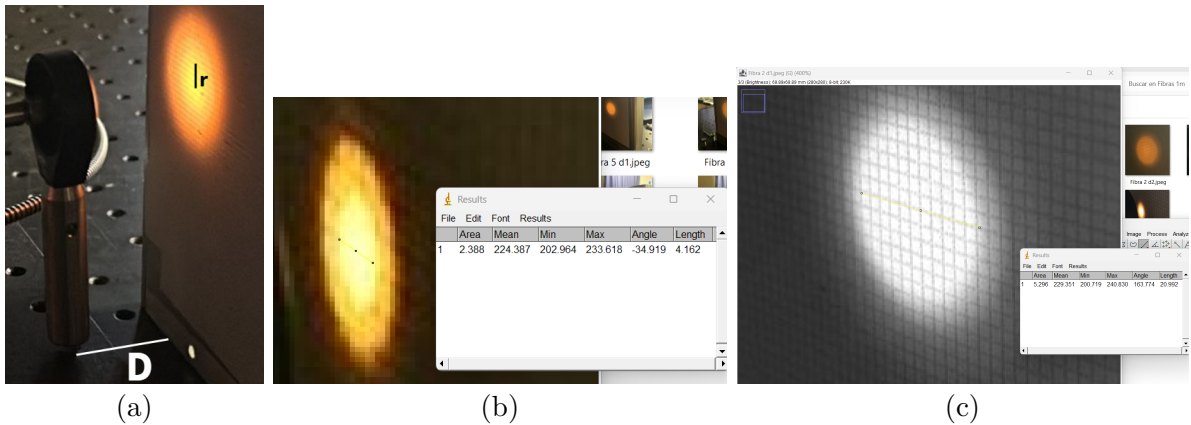


Fig. 3.6: Procedimiento medición experimental de apertura numérica de fiber-optic bundle.

(a) Medidas de interés; (b) Medición de diámetro a escala; (c) Ajuste de imagen (RGB).

3.4.2. Resultados

Los valores de r y D valores son reemplazados en la ec. (1.10), obteniendo los resultados de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resultados de cálculo experimental de apertura numérica de cada fiber-optic bundle.

N° FOB (1 m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
NA	0.2126	0.2191	0.2230	0.2244	0.2468	0.2315	0.2421	0.2457	0.2403	0.2383	0.2324
N° FOB (2 m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
NA	0.2099	0.2379	0.2336	0.2383	0.2348	0.2360	0.2461	0.2485	0.2311	0.2447	0.2361

3.4.3. Discusión

Sólo 2 FOB de 20 obtuvieron un valor cercano a 0.22 (FOB 3 y 4 de 1 m). El valor de NA tiene directa relación con el ángulo de aceptación de un FOB, por lo que, al existir diferencias en dicho ángulo, se pueden presentar diferencias o pérdidas frente a desalineamientos con fuentes de luz, o en acoplamientos. Además, frente a estos resultados, se concluye que el proveedor no ha cumplido con las especificaciones indicadas en el datasheet.

3.5. Pruebas de desalineamiento óptico

Antes de proceder con las pruebas de estrés mecánico, se realizaron diversas pruebas de desalineamiento óptico a los fiber-optic bundles, con el objetivo de encontrar algún patrón de comportamiento en la transmisión, durante el uso de conectores, durante el desalineamiento de estos, y durante el desalineamiento del fiber-optic bundle respecto a fuente(s) de luz. Las pruebas de desalineamiento óptico realizadas fueron:

1. Pérdidas por uso de conectores.
2. Desalineamiento rotacional entre terminales.
3. Desalineamiento respecto a una fuente de luz.
4. Desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz.
5. Revertir terminales.

3.5.1. Pérdidas por uso de conectores

3.5.1.1. Descripción

Se necesitan n fiber-optic bundles conectados entre sí, con $n-1$ conectores, con el objetivo de medir pérdidas por el número de conectores entre FOB. Se utiliza lámpara estabilizadora de calibración Throlabs SLS202L/M como fuente de luz, conectada a un primer FOB, mientras que, un segundo FOB se conecta al espectrómetro, y entre sí van unidos con un conector SMA-SMA. Al contar con FOB de 1 y 2 m , se realizan distintas combinaciones de mediciones entre estos, y a su vez, con 0, 1 y 2 conectores.

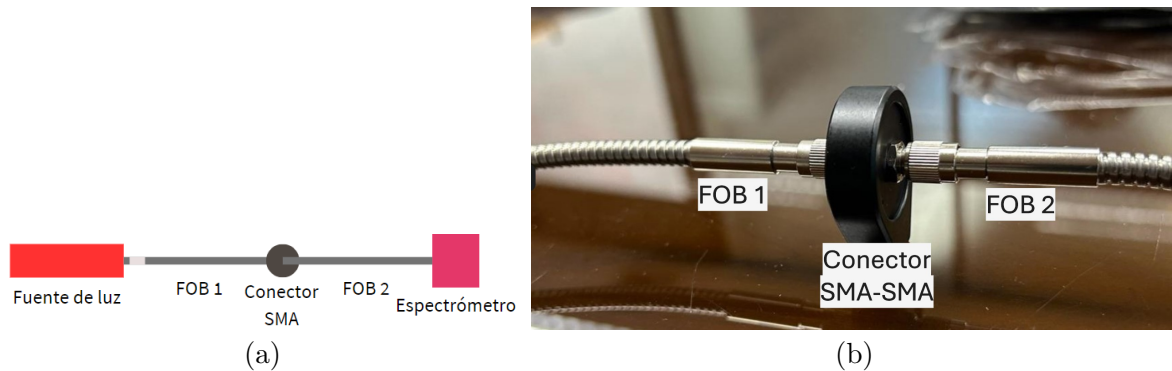


Fig. 3.7: Setup de prueba de pérdidas por uso de conectores.

(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

3.5.1.2. Resultados

Se combinaron FOB de 1 y 2 m , con 0, 1 y 2 conectores, siendo 9 mediciones en total: 2 con 0 conectores, 3 con 1 conector y 4 con 2 conectores. Resultados se promedian por número de conector. Se presenta la razón de transmitancia por número de conectores en la Fig. 3.8, y resultados de poder de emisión total y error en el cálculo de temperatura, en la Tabla 3.2 y Fig. 3.9. Resultados detallados en Anexo A.0.1.

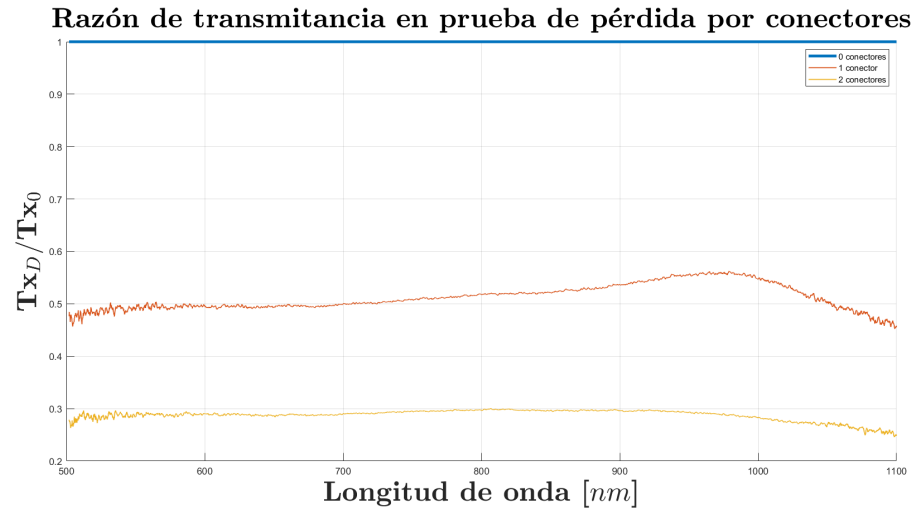


Fig. 3.8: Razón de transmitancia espectral en prueba de pérdidas por conectores en función del número de conectores utilizados.

Tabla 3.2: Pérdidas promedio debido a uso de conectores entre fiber-optic bundles y temperatura calculada.

N° conectores	Poder total de emisión espectral prom. [mW/cm^2]	Pérdidas promedio (%)	Pérdidas promedio (dB)	T° calculada promedio [K]	Error T° calculada [%]
0	5998.0	-	-	1920.5	-
1	3117.8	48.02	2.84	1894.7	1.34
2	1703.8	71.59	5.47	1915.6	0.25

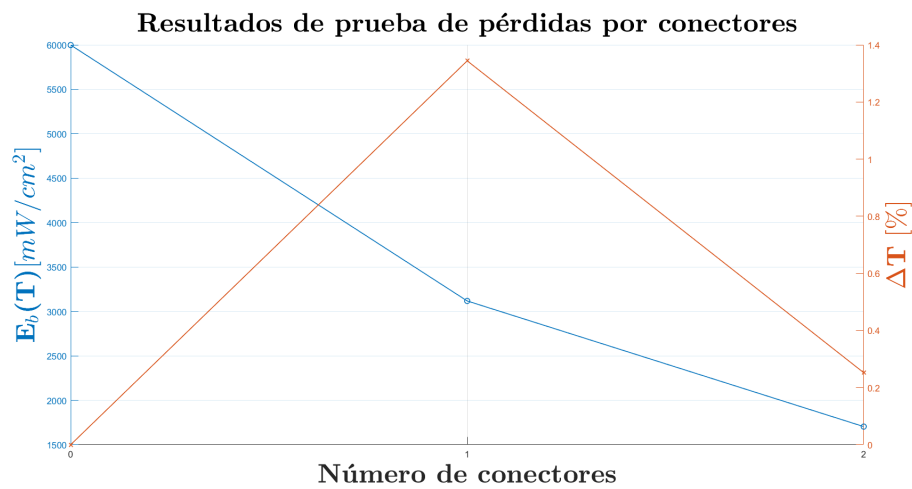


Fig. 3.9: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de pérdidas por conectores.

3.5.1.3. Discusión

Analizando los resultados, se tiene que al utilizar 1 conector en promedio la potencia de la transmisión disminuye aproximadamente a la mitad, y al utilizar 2 conectores, la potencia disminuye a un tercio de la original aproximadamente.

En la Fig. 3.8, la curva correspondiente a la razón de transmitancia de 1 conector presenta una deformación, con respecto a la curva de 2 conectores. Esto se ve reflejado en el cálculo de temperatura, ya que, el error en la temperatura calculada (respecto a 0 conectores), es mayor en el caso de 1 conector, con respecto al caso de 2 conectores. Sin embargo, el número de conectores afecta al cálculo de temperatura en menos del 2 %.

3.5.2. Desalineamiento rotacional entre terminales

3.5.2.1. Descripción

Se conectan 2 FOB mediante conectores SMA-SMA, con el objetivo de causar un desalineamiento rotacional entre los terminales. Esto se consigue conectando uno de los FOB a una herramienta angularmente graduada, cada 2° , y frente a esta, a una distancia de 1 cm, se ubica otro FOB, el cual queda fijo. El FOB que rota va conectado a la lámpara estabilizadora de calibración Throlabs SLS202L/M, que funciona como fuente de luz, y el FOB que queda fijo va conectado al espectrómetro.

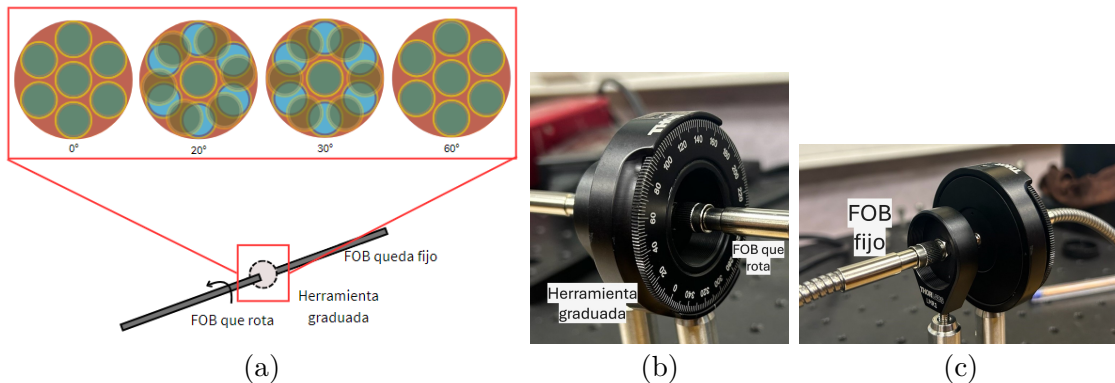


Fig. 3.10: Setup prueba de desalineamiento rotacional.

(a) Esquema setup; (b) FOB conectado a herramienta graduada; (c) FOB fijo.

3.5.2.2. Resultados

Antes de comenzar con las mediciones, se buscó manualmente el punto donde la transmisión tiene mayor potencia, definiendo así ese punto como el 0° de desviación (referencia). A partir de éste punto, se rotaron 60° en sentido horario y 60° en sentido antihorario, donde mediciones del espectro se tomaron cada 2° de desviación. La razón de transmitancia se modeló en función del grado de desviación. Para los casos de 0° , 20° , 30° , 40° y 60° en sentido horario, se presenta en la Fig. 3.11. Resultados de poder de emisión total y error en el cálculo de temperatura se presentan en la Fig. 3.12. Resultados detallados en Anexo A.0.2.

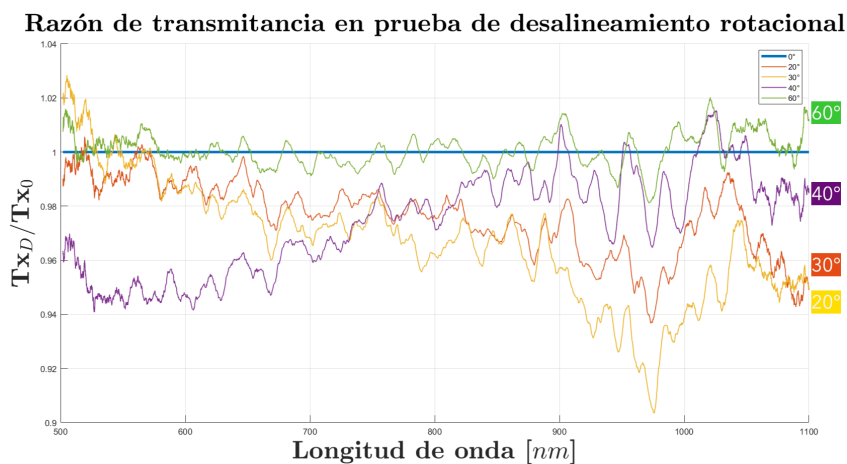


Fig. 3.11: Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento rotacional en función del ángulo de desviación, para los casos de 0° , 20° , 30° , 40° y 60° en sentido horario.

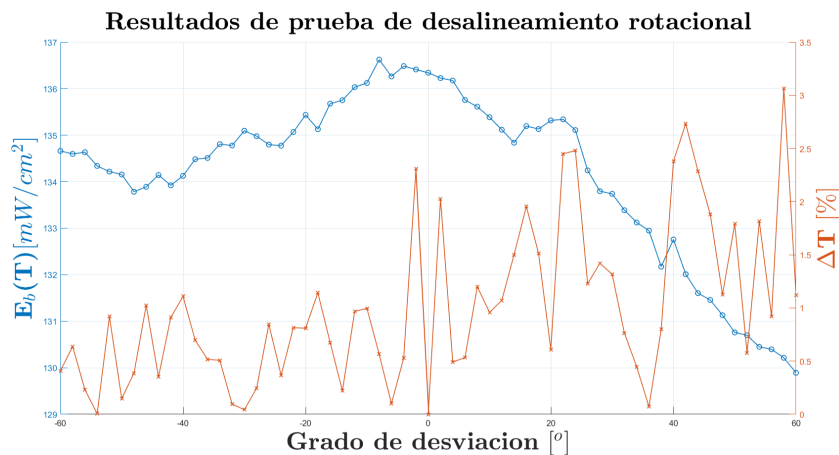


Fig. 3.12: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento rotacional.

3.5.2.3. Discusión

En la Fig. 3.11, la razón de transmitancia espectral no tuvo gran variación, pues, en general, se obtuvieron valores mayores a 0.9, para todas las longitudes de onda.

De la teoría vista en la subsección 1.3.8, en la Fig. 1.12, se estudió que, hay un patrón repetitivo en la transmisión cada cierto número de grados de desviación angular, el que para este caso en particular, a los 30° de desviación se alcance un mínimo en el poder de transmisión espectral, y a los 60° vuelva al punto máximo en el poder de transmisión espectral, siendo el mismo que en 0° . En la Fig. 3.12, de los resultados se aprecia que, en sentido antihorario, la intensidad de la transmisión quedó oscilante en valores cercanos entre sí, mientras que, para la desviación en el sentido horario, la intensidad de el poder de transmisión fue en descenso constante.

Por otro lado, respecto a la temperatura calculada, esta tuvo un margen de error cercano al 3 %, concluyendo así que la prueba no afecta en gran medida el cálculo de temperatura.

3.5.3. Desalineamiento respecto a una fuente de luz

3.5.3.1. Descripción

Se debe ubicar un fiber-optic bundle frente a una fuente de luz. El FOB debe rotar sobre su propio eje, con el objetivo de que reciba la luz desde distintos ángulos. Para esta prueba se utiliza la lámpara de Tungsteno ($\sim 1990^\circ$) como fuente de luz, ubicado a 30 *cm* del FOB, y a la misma altura de éste. Para que pueda rotar el FOB, se ubica sobre una herramienta graduada angularmente cada 2° .

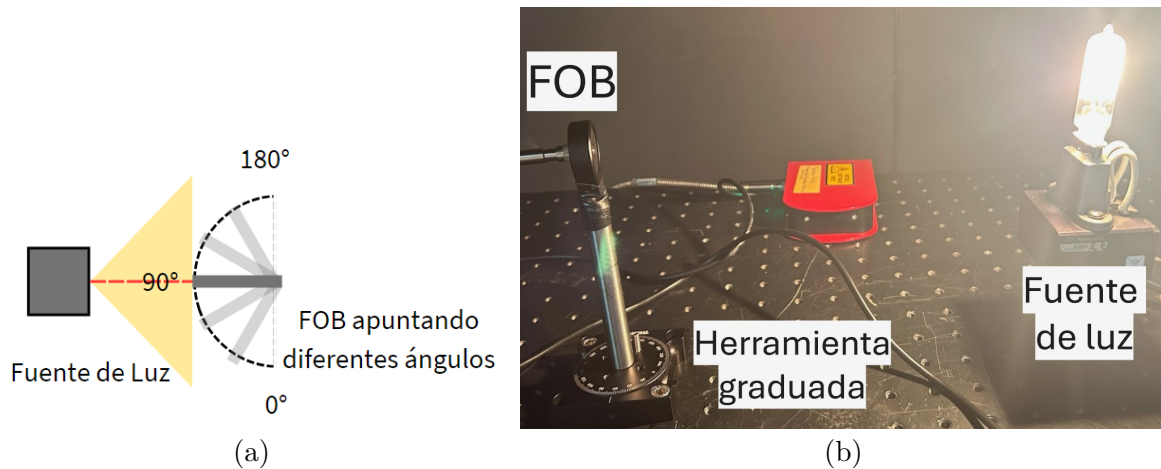


Fig. 3.13: Setup de prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz.

(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

3.5.3.2. Resultados

Antes de comenzar con las mediciones, manualmente se buscó el punto donde la transmisión es máxima, definiendo ese punto como el 0° de desviación. Luego, se tomaron mediciones, en sentido horario y antihorario, cada 2° de desviación, hasta los 10° , que es el punto donde se pierde casi en su totalidad la transmisión. En la Fig. 3.14 se presenta la razón de transmitancia, para los casos de 0° - 10° de desviación en sentido horario, y en la Fig. 3.15 los resultados de poder de emisión total y cálculo de temperatura. Resultados detallados en Anexo A.0.3.

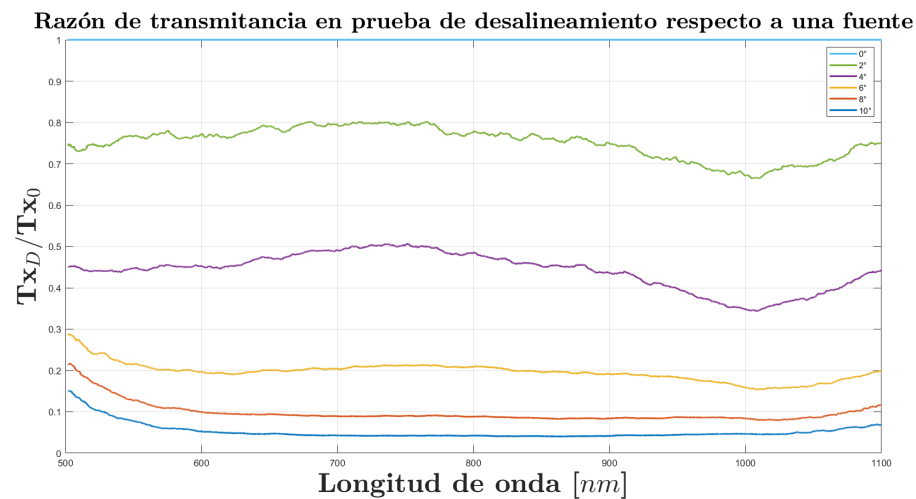


Fig. 3.14: Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz en función del ángulo de desviación, para los casos de 0° , 2° , 4° , 6° , 8° y 10° en sentido horario.

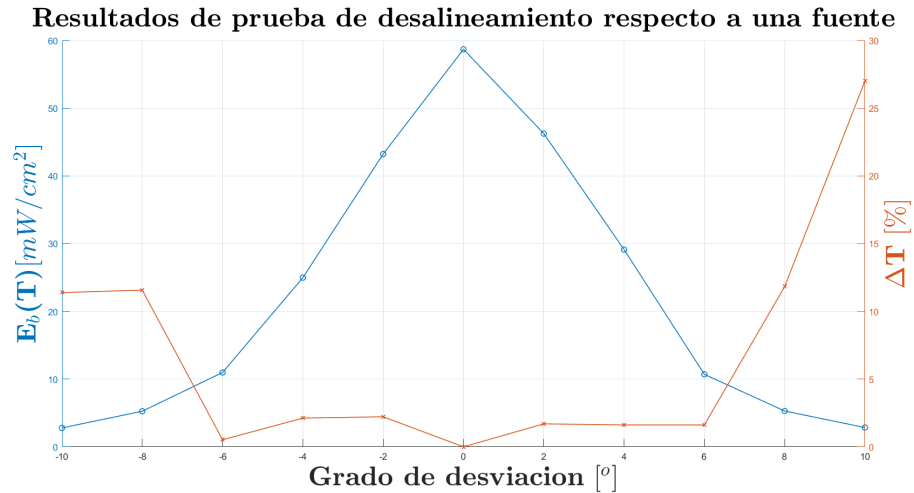


Fig. 3.15: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz.

3.5.3.3. Discusión

Cuando un fiber-optic bundle se encuentra apuntando directamente a una fuente de luz, su razón de transmitancia espectral es de un 100 %, y a medida que un FOB recibe la luz con cierto ángulo de desviación, la razón de la transmitancia disminuye, tal como se ve en la Fig. 3.14.

En la Fig. 3.16, se ven dos imágenes tomadas con un microscopio de fibra óptica a un mismo FOB; en la Fig. 3.16 (a) la luz llega directamente al FOB, visualizando sus núcleos de un color uniforme. Por otro lado, en la Fig. 3.16 (b), el FOB se desvió de la fuente de luz, apreciando la no uniformidad en el color de sus núcleos, lo que se puede traducir como pérdidas en la transmisión respecto al caso (a). Sabiendo que los FOB utilizados son multimodo, y según lo visto en la teoría, en la subsección 1.3.5, la Fig. 3.16 (b) se puede notar similitud en ciertos modos de propagación de la Fig. 1.4, por lo que, la Fig. 3.16 (b) se puede interpretar como un modo de propagación, o una suma de éstos.

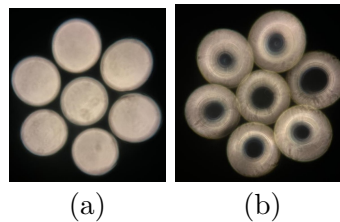


Fig. 3.16: Imágenes tomadas a un microscopio de fiber-optic bundle mientras este transmite luz.

(a) Transmisión uniforme; (b) Transmisión con ángulo de desviación respecto a la fuente.

De los resultados presentados en la Fig. 3.15, se observa que el poder de emisión total disminuye a medida que se desvía el FOB de la fuente, tanto en sentido horario como antihorario. El poder de emisión total decayó aproximadamente a la mitad a los 4° de desviación respecto a la fuente, y disminuyó casi en su totalidad a los 10° respecto a la fuente. Con respecto a la temperatura calculada, esta presentó errores $<3\%$ hasta los 6° de desviación, y $>10\%$ sobre los 8° de desviación, tanto en sentido horario como antihorario.

3.5.4. Desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz

3.5.4.1. Descripción

Se ubica un fiber-optic bundle, el cual queda fijo, apuntando a 20 cm de una fuente de luz principal, en este caso la lámpara estabilizadora de calibración Throlabs SLS202L/M. A su vez, una segunda fuente de luz, la lámpara de Tungsteno, se ubica desde distintos ángulos frente a éste, a una distancia de 20 cm , sobre una referencia con ángulos, tal como se ve en la Fig. 3.22 (b). El objetivo es ver el comportamiento de la transmisión, a medida que el FOB recibe luz de ambas fuentes desde distintos ángulos.

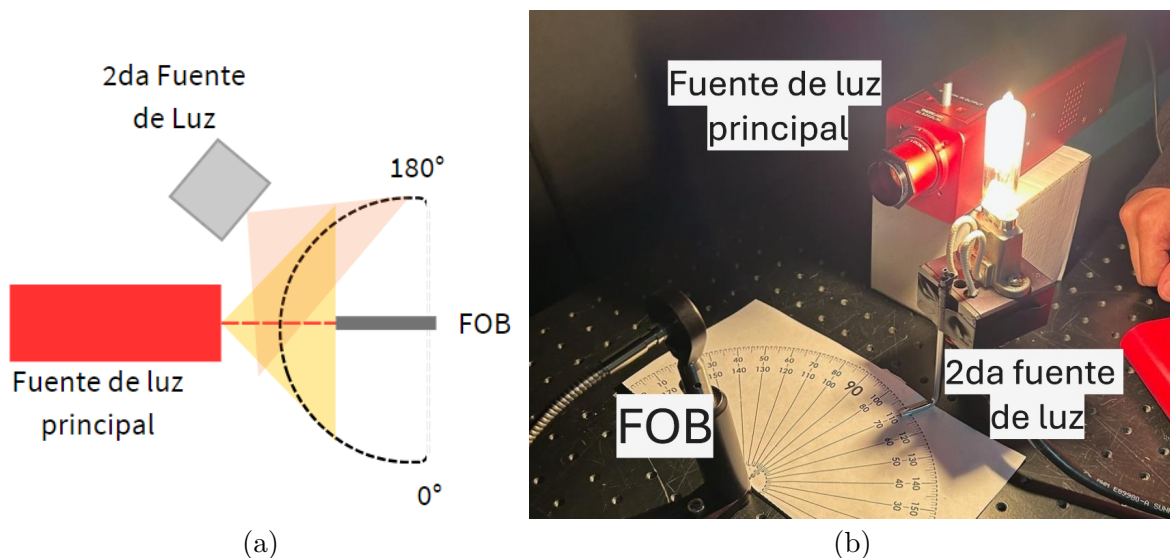


Fig. 3.17: Setup de prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz.

(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

3.5.4.2. Resultados

Para esta prueba, la fuente principal de luz se ubicó frente al FOB. Para definir el punto de partida, o de 0° de desviación con respecto a la segunda fuente, ésta se ubicó sobre la primera fuente, apuntando al FOB. La medición tomada en dicho punto se definió como el 0° de desviación. Luego, por disposición del setup, se realizaron mediciones desde los 14° de desviación, dado que la fuente principal interfería con la fuente secundaria, de 1° a 13° . Las mediciones se realizaron cada 3° , desde los 14° hasta los 32° . A mayor desviación, se pierde el efecto de la segunda fuente. En la Fig. 3.18, se presenta la razón de transmitancia para 3 casos, el caso de 0° de desviación, donde se ubican las 2 fuentes juntas, para el caso 14° de desviación, que corresponde a la primera medición con la segunda lámpara desviada, y el caso de 32° de desviación, que corresponde a la última medición con la segunda lámpara desviada. Resultados presentados en la Fig. 3.19. Resultados detallados en Anexo A.0.4.

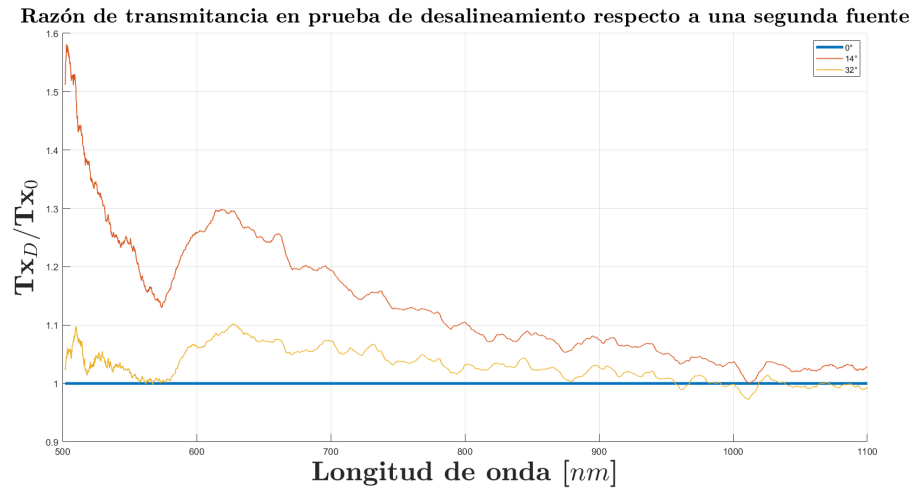


Fig. 3.18: Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz, en función del grado de desalineamiento de ésta, para 0° , 14° y 32° de desviación.

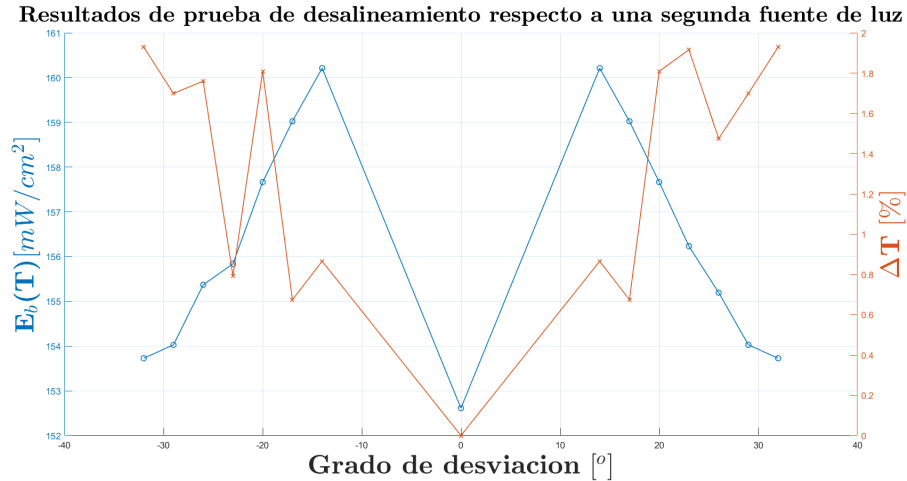


Fig. 3.19: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz.

3.5.4.3. Discusión

De la Fig. 3.18, se ve que la razón de transmitancia alcanzó un máximo de 1.6, para el caso de menor desviación, y un valor cercano a 1.1, para el caso de mayor desviación, lo que significa que a medida que la segunda fuente se aleja, la razón de transmitancia se acerca a la de referencia.

Por otro lado, los resultados de la Fig. 3.19 fueron simétricos en los sentidos horario y antihorario. Con respecto al poder de emisión total, este tuvo un aumento a los 14° de desviación de la segunda fuente, comparado con la medición de referencia, a los 0° (ambas lámparas juntas). A medida que la segunda fuente se fue desviando, la potencia volvió a disminuir, acercándose al valor original. Por otro lado, el error en la temperatura calculada respecto a la medición de referencia, a los 0° de desviación, tuvo una variación máxima del 2%.

Así, al utilizar dos fuentes de luz, una fija y otra móvil, se transmite luz con mayor intensidad cuando estas se encuentran ligeramente desviadas, y a medida que esta desviación va en aumento, se acerca a la intensidad de señal inicial.

3.5.5. Revertir terminales

3.5.5.1. Descripción

Se conecta un fiber-optic bundle desde una fuente de luz, lámpara estabilizadora de calibración Thorlabs SLS202L/M en este caso, hasta el espectrómetro. Luego, se invierte el sentido de conexión según la etiqueta. Como se ve en la Fig. 3.20, se considera como tramo A-B desde el espectrómetro a la lámpara calibradora. Luego, se conecta en el sentido B-A. Se utiliza un sticker de referencia para el lado A, que traen todos los FOB.

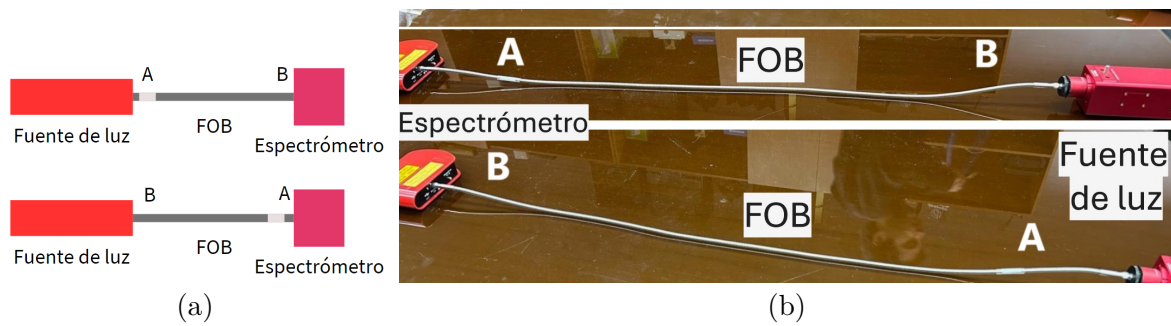


Fig. 3.20: Setup prueba de revertir terminales.

(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

3.5.5.2. Resultados

Para el análisis se utilizó la ec. (3.8) de error porcentual absoluto del poder de emisión espectral $\Delta E(\lambda)$, para las mediciones en el sentido A-B y B-A, que da como resultado el error absoluto relativo porcentual entre el tramo espectrómetro-lámpara y viceversa, donde el primer tramo se considera como referencia. Se obtienen la siguiente resultados para 5 FOB:

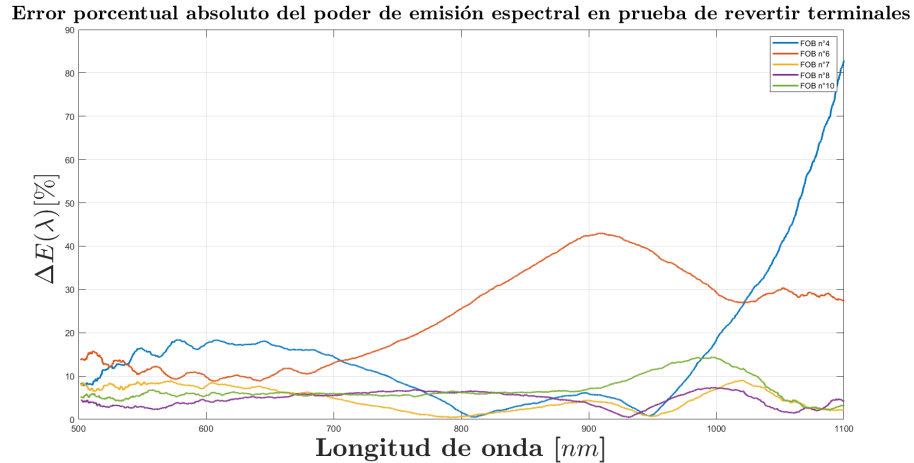


Fig. 3.21: Error porcentual absoluto del poder de emisión espectral en prueba de revertir terminales para los fiber-optic bundles n° 4, 6, 7, 8 y 10.

3.5.5.3. Discusión

De las 5 pruebas, se ve en la Fig. 3.21 que para los FOB n° 7, 8 y 10, el error es menor al 15 % para todos los valores de longitud de onda, mientras que para los FOB n° 4 y 6, alcanza valores más altos, alcanzando un 40 % en el n°6 y hasta un 80 % en el n°4. De esto se puede concluir que, al revertir los terminales de un mismo FOB, y medir la transmisión, esta puede no ser la misma en ambos sentidos.

3.6. Pruebas de estrés mecánico

Un fiber-optic bundle en la industria puede estar expuesto a ambientes adversos, lo cual puede incluir tensiones mecánicas, vibraciones, cambios de temperatura, manipulaciones indebidas por parte de los operadores, etc.

Una vez realizadas las diversas pruebas de desalineamiento óptico a los FOB, se procedió a realizar las pruebas de estrés mecánico. Esto es debido a que, en las pruebas de desalineamiento óptico, los FOB no sufrieron daños, pudiendo reutilizar los FOB para las pruebas de estrés mecánico, donde se llevaron hasta la falla catastrófica. Las pruebas de estrés mecánico realizadas fueron:

1. Tracción.

2. Flexión.
3. Sometimiento a altas temperaturas.

3.6.1. Pruebas de tracción

3.6.1.1. Descripción

Las pruebas de tracción son esenciales para poder evaluar la resistencia mecánica de los FOB frente a fuerzas de tracción, así como también para verificar la variación en la transmisión mientras sufre estas cargas tensionales. El objetivo es encontrar el o los puntos cruciales de fuerza donde la transmisión sufre cambios significativos. La prueba se realiza para:

1. La chaqueta del FOB.
2. La sonda del FOB.

Para estas pruebas se utiliza una máquina traccionadora Zwick/Roell disponible en el departamento de Ingeniería Mecánica. Se ubica un FOB transmitiendo, desde la lámpara estabilizadora de calibración Thorlabs SLS202L/M, hasta el espectrómetro. El FOB se sujeta en la máquina traccionadora de 2 puntos, aproximadamente a la mitad del cuerpo del FOB, con una separación entre 20-30 *cm* en los agarres.

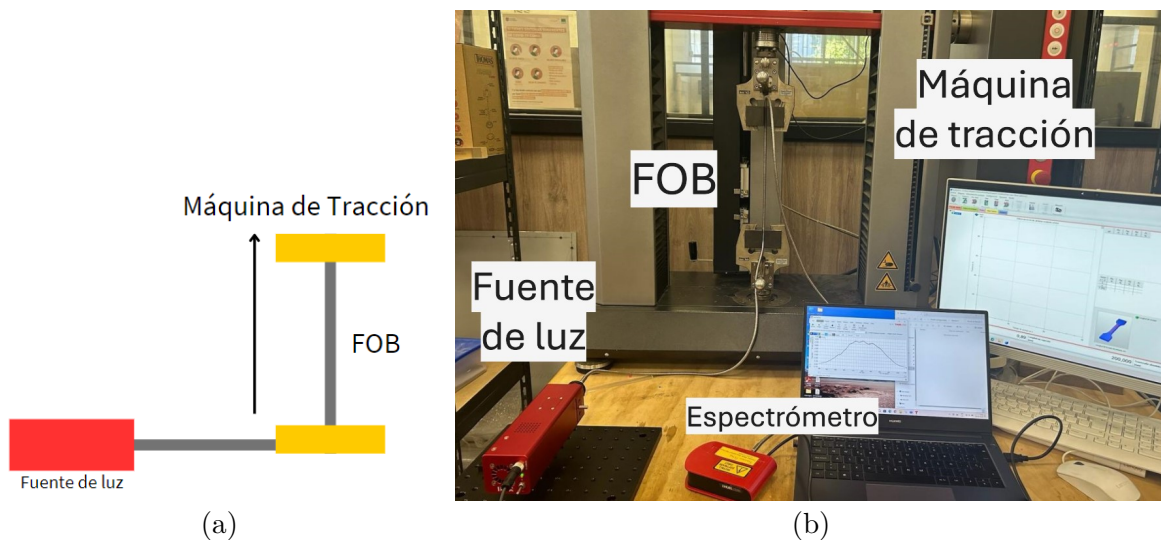


Fig. 3.22: Setup prueba de tracción.
(a) Esquema setup; **(b)** Implementación setup.

3.6.1.2. Tracción de chaqueta de fiber-optic bundle

1. Resultados

La capa externa de un FOB, se conoce como chaqueta, la cual está fabricada de acero. Debido a su rigidez, es crucial para la protección de las fibras al interior. Mientras se realizó la prueba, la transmisión no sufrió ninguna perturbación.

La prueba se realizó 7 veces, donde los resultados se presentan a continuación, en la Tabla 3.3. La prueba se realizó a distintas velocidades de tracción, donde en promedio se obtuvo que la chaqueta protectora se tracciona, es decir, se rompe, y pierde su rigidez, a los 842.75 N. Una muestra se presenta en la Fig. 3.23.

Tabla 3.3: Fuerza máxima de tracción que soportan chaquetas de fiber-optic bundles.

N° de prueba	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
Fuerza máx. soportada [N]	828.31	877.42	878.89	875.46	879.01	845.87	714.25	842.75



Fig. 3.23: Chaqueta de fiber-optic bundle traccionada.

2. Discusión

Una vez alcanzado un valor cercano a los 800 N en fuerza de tracción, la chaqueta del FOB pierde su rigidez, y la sonda queda ligeramente expuesta. A pesar de ello, la transmisión no se ve afectada. Así, la transmisión a través del FOB con la chaqueta, no se ve perturbada hasta los 800 N aproximadamente.

3.6.1.3. Tracción de sonda de fiber-optic bundle

1. Resultados

Una vez traccionada la chaqueta, esta es retirada de manera manual, procediendo con la prueba de tracción de la sonda de los FOB. Se registran automáticamente 15 muestras/segundo del espectro. A medida que el fiber-optic bundle se va estirando, las fibras al interior se van rompiendo, disminuyendo la intensidad de la señal, hasta que esta llega a 0, con la ruptura total de las fibras. Una muestra de esto se ve en la Fig. 3.24:

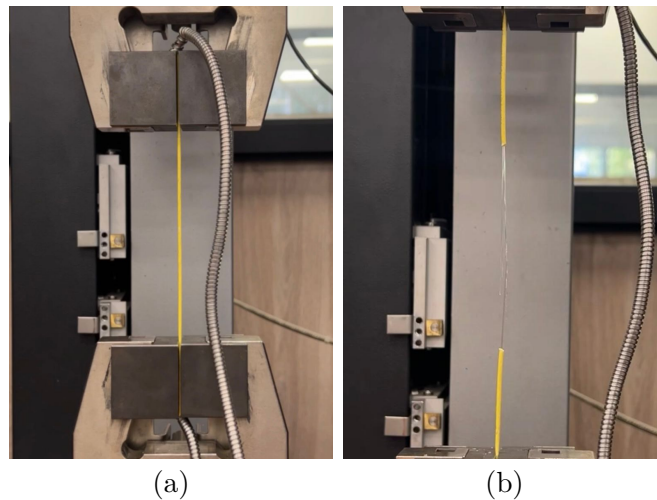


Fig. 3.24: Sonda de fiber-optic bundle en prueba de tracción.

(a) Sonda sin traccionar; **(b)** Sonda traccionada en su totalidad (con fibras expuestas).

La sonda que cubre las fibras está fabricada de poliamida, material que tiene menos resistencia que el acero. A continuación, en la Fig. 3.25 (a) se presenta una comparativa entre Fuerza v/s Duración de la prueba, y en la Fig. 3.25 (b) los espectros de la transmisión en 5 puntos cruciales. Estas mediciones fueron hechas para el FOB n°4. Más pruebas se encuentran documentadas en el Anexo A.0.6.

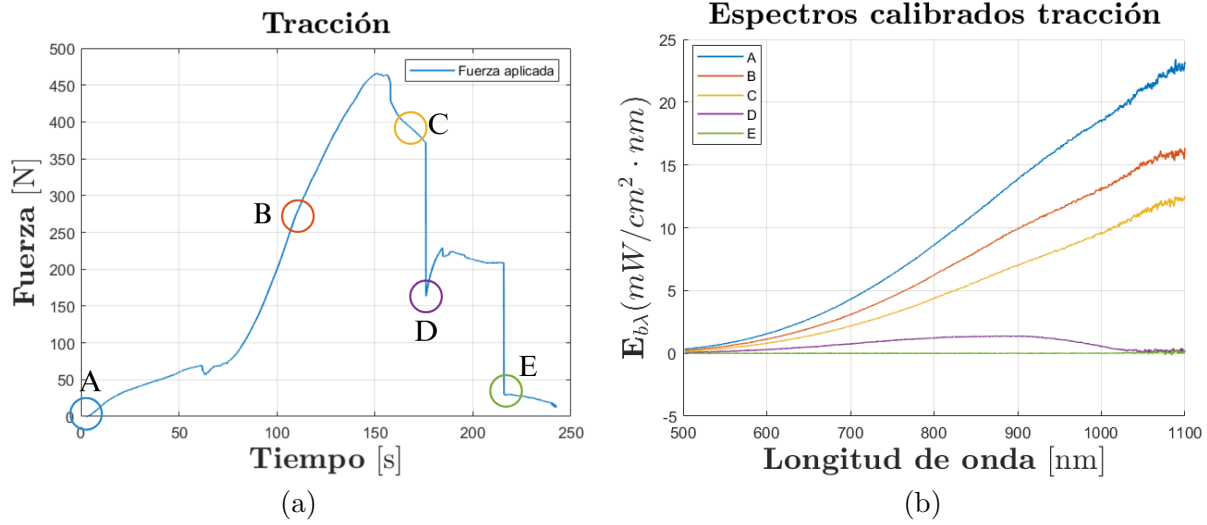


Fig. 3.25: Fuerza y espectros en prueba de tracción.

(a) Fuerza [N] v/s duración de la prueba [s]; (b) Espectros en distintos puntos de prueba de tracción.

Donde los puntos corresponden a los tiempos bajo tracción: A: 0 s, B: 109 s, C: 175 s, D: 176 s, E: 216 s. La transmitancia en dichos puntos se presenta a continuación, en la Fig. 3.26:

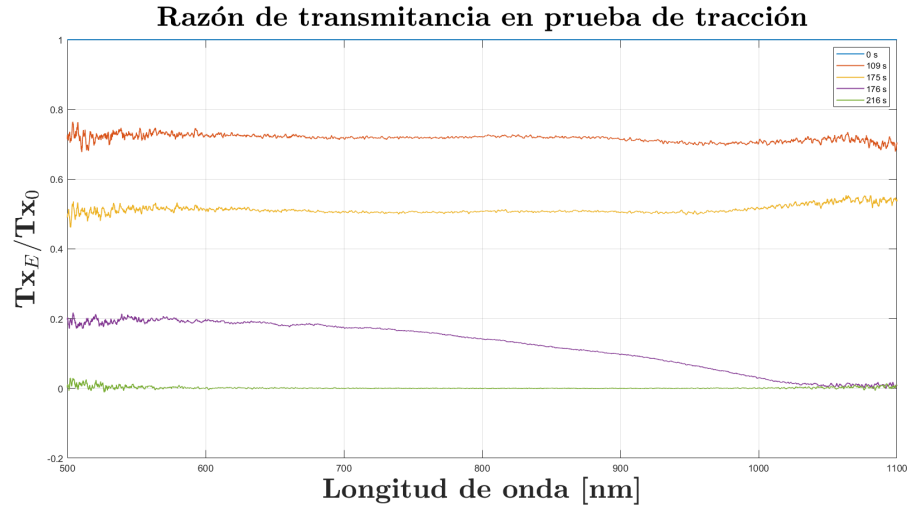


Fig. 3.26: Razón de transmitancia en prueba de tracción en función de la duración de la prueba, en puntos cruciales.

Resultados en dichos puntos se presentan en la Tabla 3.4, y para más puntos se presentan en la Fig. 3.27.

Tabla 3.4: Resultados de fuerza, poder total de emisión espectral, temperatura calculada, y error de temperatura calculada en puntos cruciales de prueba de tracción.

Punto	Fuerza [N]	Poder total de emisión espectral [mW/cm^2]	Pérdidas [%]	T° calculada [K]	Error en T° calculada [%]
A	0	5874.9	-	1898.0	-
B	270.72	4185.3	28.7	1914.2	0.85
C	386.35	3034.2	48.3	1934.7	1.94
D	166.57	433.1	92.6	2045.9	7.79
E	31.22	-	100	-	-

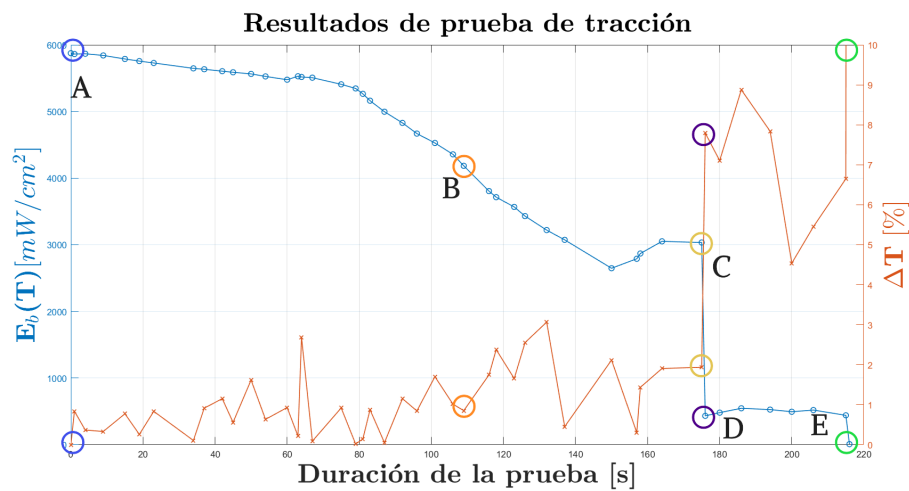


Fig. 3.27: Resultados de poder total de de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de tracción.

2. Discusión

Entre el punto A (0 s) y el punto B (109 s), la fuerza de tracción va en aumento, y a su vez, el poder de emisión comienza a decaer, cercano a un 30 %. Antes de llegar al punto C (175 s), la fuerza de tracción alcanza un máximo cercano a los 450 N. A este punto, la transmisión ya alcanza pérdidas cercanas al 50 %. Luego, la fuerza decae hasta el punto D (176 s). Esta caída abrupta en la fuerza se traduce en la ruptura de una fibra, lo que se ve reflejado en la transmisión, ya que el poder de emisión decae cercano a un 90 %, para finalmente perder la transmisión total en el punto E (216 s). Con respecto al cálculo de temperatura, esta se mantiene en el margen de error del 3 % hasta el punto C (175 s). Luego del punto D (176 s) el error aumenta, pero se mantiene con valores bajo el 10 %.

3.6.2. Pruebas de flexión

3.6.2.1. Descripción

Otro tipo de daño o estrés mecánico que pueden sufrir los fiber-optic bundles es el causado por una flexión, lo que termina en una curvatura excesiva y una ruptura de la chaqueta, y de las fibras al interior. El objetivo de esta prueba es ver el comportamiento de la transmisión de un FOB a medida que el grado de flexión aumenta.

Para esto, se ubica un FOB al interior de una prensa tornillo, transmitiendo desde la lámpara estabilizadora de calibración Thorlabs SLS202L/M, hasta el espectrómetro. El FOB ya se encuentra con un radio de curvatura inicial, el cual no perturba la transmisión.

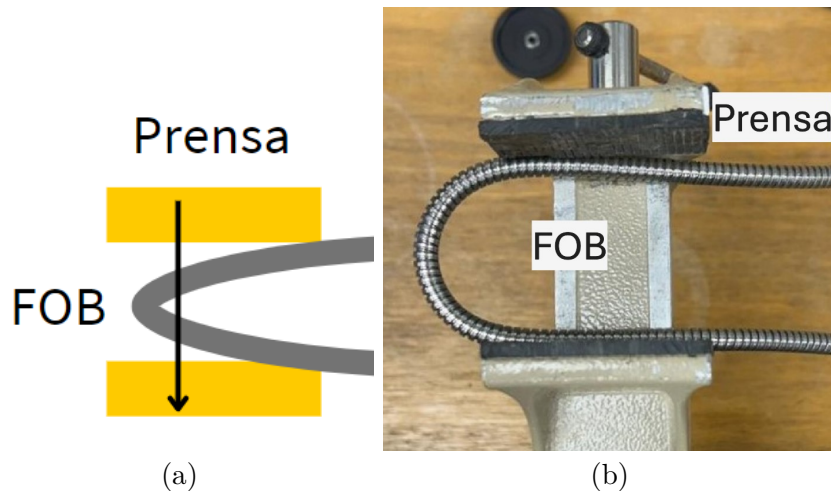


Fig. 3.28: Setup prueba de flexión.
(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

3.6.2.2. Resultados

Primero se realizó la prueba para la chaqueta del FOB. Esta alcanzó un valor máximo de radio de curvatura $\sim 6 \text{ mm}$, que corresponde al diámetro de la chaqueta. Hasta este punto, la transmisión no se vio afectada. Sin embargo, la chaqueta perdió su rigidez, tal como se ve en la Fig. 3.29 (a). Luego, esta chaqueta es retirada, y la prueba se realiza de la misma manera, pero con la sonda del FOB, como se ve en la Fig. 3.29 (b). Los resultados documentados corresponden al FOB n°1. En el Anexo A.0.7 se encuentra documentado para el FOB n°4.

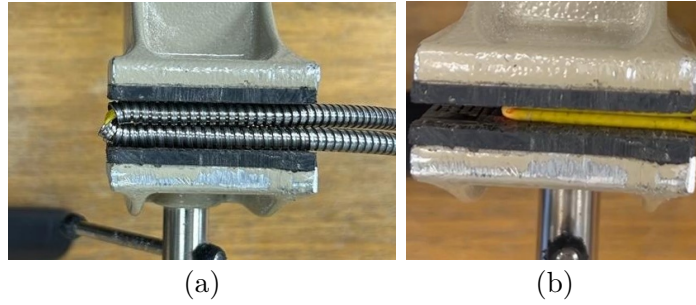


Fig. 3.29: Fiber-optic bundles en prueba de flexión.
(a) Chaqueta flexionada; **(b)** Fiber-optic bundle flexionado.

Para el análisis de la transmisión se utilizan 28 muestras, donde la primera muestra corresponde a un 0 % de flexión, y la última muestra a un 100 % de flexión, punto de ruptura. Razón de transmitancia se muestra a continuación, en la Fig. 3.30, y los resultados en la Fig. 3.31.

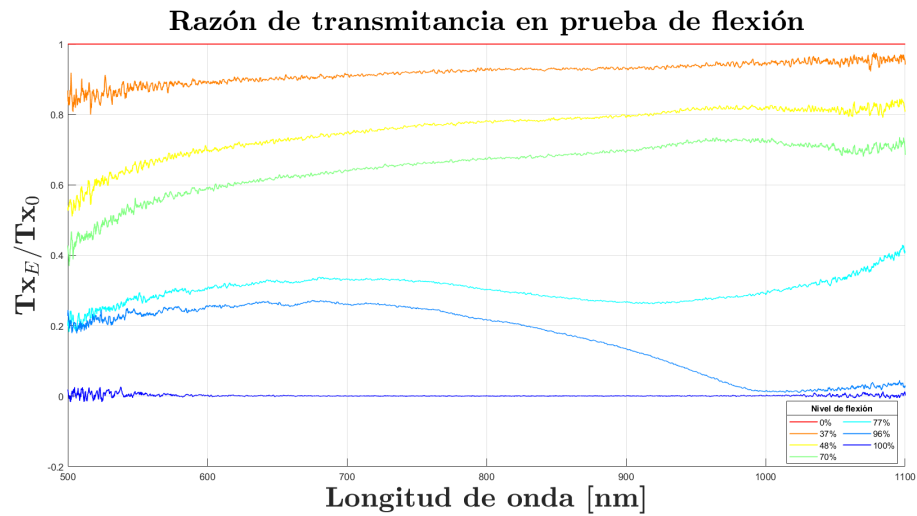


Fig. 3.30: Razón de transmitancia en prueba de flexión en distintos niveles de flexión.

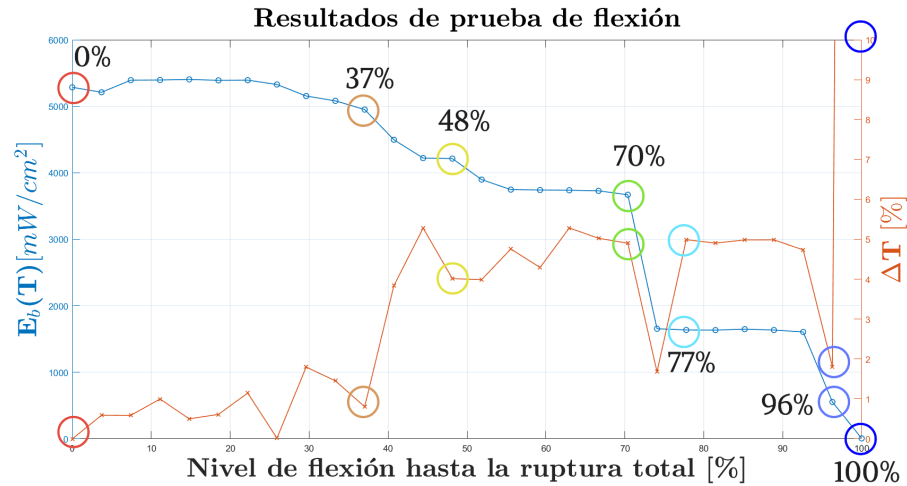


Fig. 3.31: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de flexión.

3.6.2.3. Discusión

A medida que ambas secciones del FOB se van acercando, las fibras van sufriendo su ruptura, lo que se traduce en la disminución de la intensidad de la transmisión, y por ende, la disminución de la potencia, llegando a 0 mW/cm^2 en el nivel de flexión de 100 %. Con respecto al cálculo de temperatura, esta no sobrepasó el 6 % de error mientras hubo transmisión. El error fue menor al 2 % hasta un 37 % de nivel de flexión, y luego se mantuvo cercano al 5 %, hasta la ruptura total. Debido a la disposición del setup, sólo se logró medir el radio de curvatura de la chaqueta, concluyendo que el FOB soporta hasta un radio de curvatura ~ 6 mm, por lo que, para valores inferiores a este, las fibras al interior sufren su ruptura.

Al igual que en las pruebas de tracción, en las pruebas de flexión la chaqueta cumplió la función de proteger a las fibras al interior.

3.6.3. Pruebas de sometimiento a altas temperaturas

3.6.3.1. Descripción

Como última prueba de estrés mecánico para los fiber-optic bundles, estos se sometieron a altas temperaturas, en el cuerpo y en sus conectores, para verificar el comportamiento de la transmisión mientras se enfrenta a altas temperaturas.

Para esto, se ubicó un FOB a una distancia D de la punta del mechero. Este último es alimentado por gas de cañería, disponible en laboratorio SP&R. A su vez, el FOB transmite desde la lámpara estabilizadora de calibración Thorlabs SLS202L/M, al espectrómetro.

La prueba se realiza para:

1. Chaqueta de fiber-optic bundle
2. Conectores de fiber-optic bundle

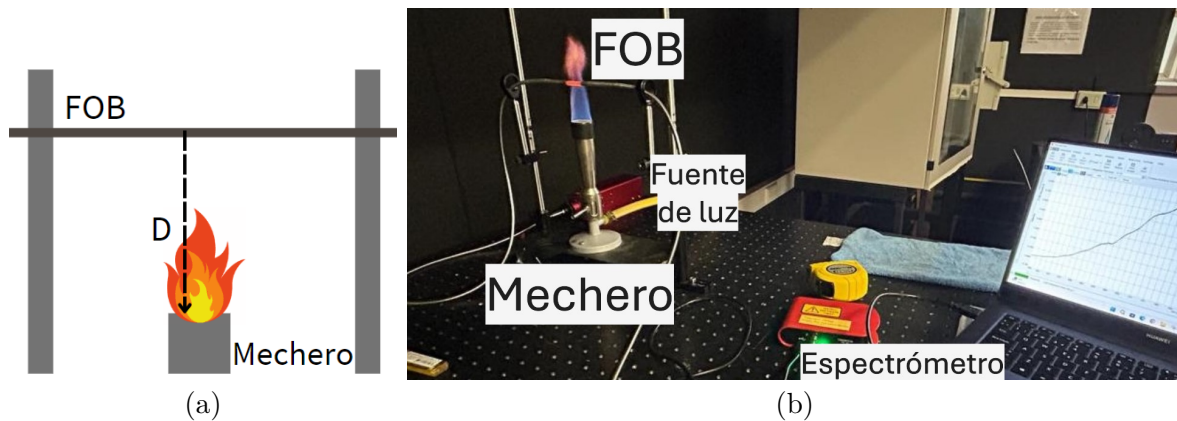


Fig. 3.32: Setup prueba de sometimiento a altas temperaturas.

(a) Esquema setup; (b) Implementación setup.

3.6.3.2. Chaqueta de fiber-optic bundle sometido a altas temperaturas

1. Resultados

Se realiza la prueba en la chaqueta del FOB, a distintas distancias, entre 7 y 12 *cm* entre la punta del mechero y la chaqueta del FOB. Registro fotográfico del estado del FOB al interior se presenta en la Tabla 3.5.

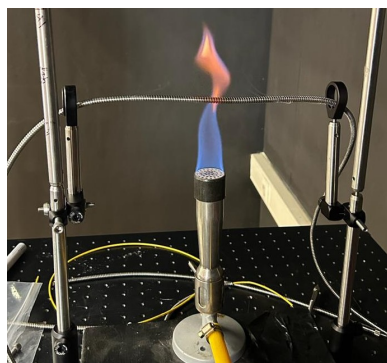
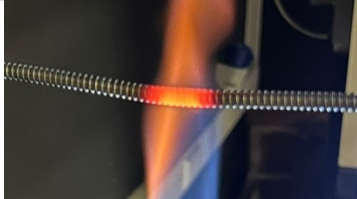
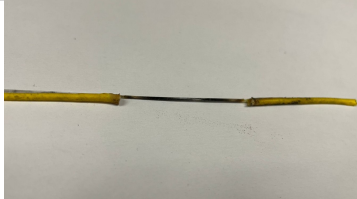
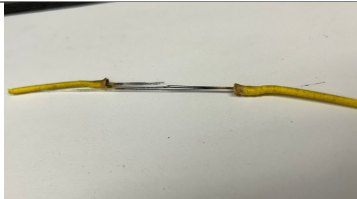
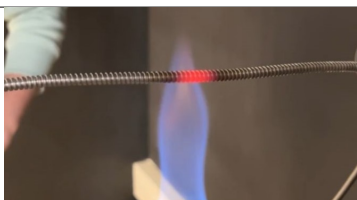
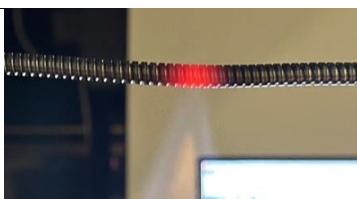
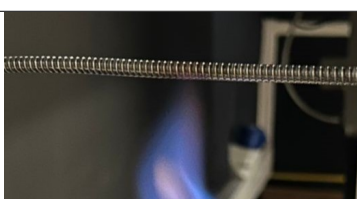


Fig. 3.33: Chaqueta de fiber-optic bundle sometida a altas temperaturas.

Tabla 3.5: Fiber-optic bundles luego de ser sometido a altas temperaturas a distintas distancias y temperaturas, durante 2 minutos.

Distancia a punta del mechero [cm]	Chaqueta quemada	Fiber-optic bundle quemado	Temperatura promedio [°C]
7			391 ($\sigma=7.79$)
8			365 ($\sigma=11.36$)
9			349 ($\sigma=16.82$)
10			333 ($\sigma=60.47$)
11			237 ($\sigma=4.95$)
12			202 ($\sigma=2.12$)

Por otro lado, se replica esta prueba a distintas distancias desde la punta del mechero, y a distintos tiempos de exposición a la llama del mechero. Una vez retirada el FOB de la llama, se tuerce levemente. De esto se obtienen 2 resultados: la ruptura inmediata de las fibras, o estas quedan sin daños.

Tabla 3.6: Resultados de distintas chaquetas de FOB expuestas a altas temperaturas.

N° FOB	Distancia a punta del mechero [cm]	Tiempo expuesto a llama [s]	T° prom. [°C]	Estado final de FOB
7	10	150	333	Dañado
8	6	600	400	Dañado
9	9	30	349	Sin daño
9	9	60	349	Dañado
10	11	180	237	Sin daño
10	8	360	365	Dañado

2. Discusión

De las imágenes de la Tabla 3.5, y de los resultados de la Tabla 3.6, se puede destacar lo siguiente:

- La chaqueta al exponerse a altas temperaturas no sufre daños, sólo cambia levemente su color. Las fibras a pesar de seguir cubiertas por la chaqueta, quedan frágiles, y de un color oscuro.
- Debido al material que está fabricada la chaqueta y las fibras, es que estas son resistentes a la combustión, no se inflaman ni desintegran, ya que, soportan temperaturas más altas. Solamente la sonda se ve afectada directamente por la temperatura.
- La sonda al interior se contrae hacia los lados, quedando expuestas las fibras. Debido a esto es que, una vez que se retira la chaqueta de la llama, y la chaqueta se tuerce, las fibras al interior se rompen en la mayoría de los casos.
- Así, si un FOB se expone a altas temperaturas (rango de 200-400 °C), este seguirá transmitiendo si es que no sufre torsión, o algún movimiento violento. Una vez que el FOB se retira del fuego, y se mueve, es probable que las fibras se rompan, perdiendo la transmisión.

3.6.3.3. Conectores de fiber-optic bundle sometido a altas temperaturas

1. Resultados

Esta prueba se realizó con 2 FOB conectados con un conector SMA-SMA. Un extremo se conectó a la lámpara estabilizadora de calibración Thorlabs SLS202L/M, y el otro extremo al espectrómetro.

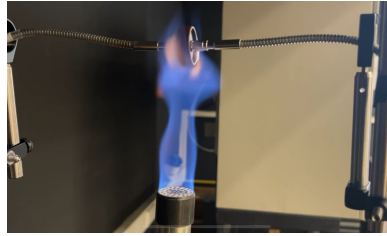


Fig. 3.34: Conector de fiber-optic bundle sometido a altas temperaturas.

El conector se ubicó a 9 *cm* de la punta del mechero, y se expuso a una temperatura de 260°C promedio. La prueba finaliza una vez que la transmisión se pierde completamente. El sistema se deja enfriar, y luego se procede a inspeccionar los conectores. Estos quedan como en la Fig. 3.35(b):

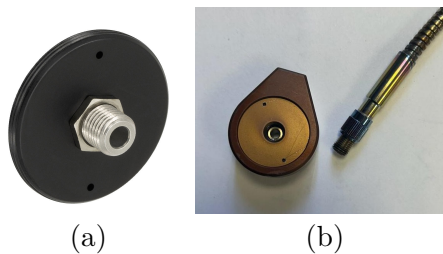


Fig. 3.35: Conectores SMA.

(a) Adaptador SMA; (b) Conector sometido a altas temperaturas.

Las variaciones de la razón de transmitancia se presentan a continuación, en la Fig. 3.36, y los resultados en función del tiempo al que se expuso a la llama, se presentan en la Fig. 3.37. Mayor documentación se encuentra en Anexo A.0.8.

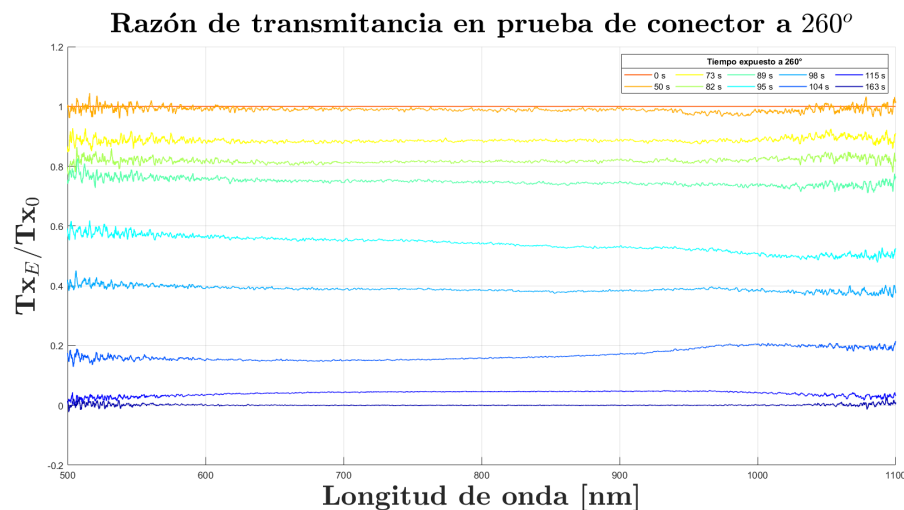


Fig. 3.36: Razón de transmitancia en prueba de conector a 260° en función del tiempo que estuvo expuesto.

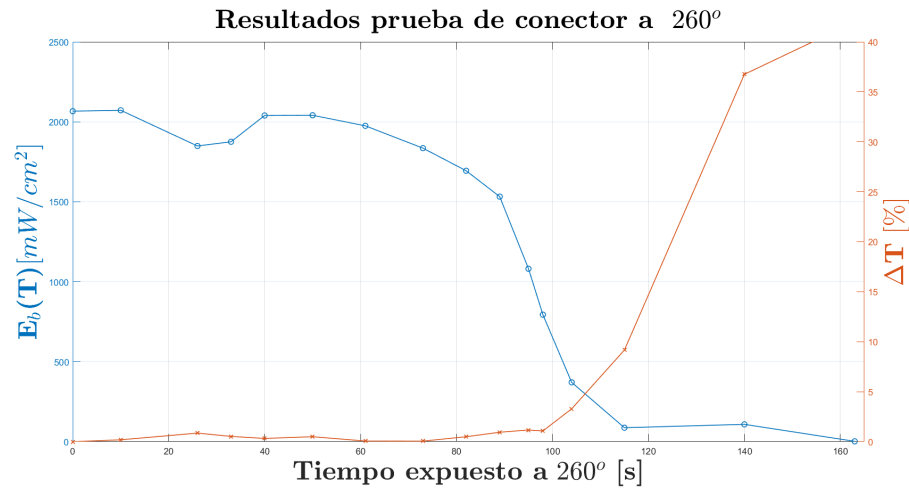


Fig. 3.37: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de conector a 260°.

2. Discusión

Un conector, al exponerse a 9 cm de la punta de un mechero, alcanzando una temperatura promedio de 260°, pierde su transmisión completamente a los 160 s aproximadamente. A los 95 s, la potencia decae a la mitad, para luego decaer casi por completo a los 115 s. En el cálculo de temperatura, esta no tuvo mayor variación hasta los 100 s, manteniéndose con un error inferior al 3 %. Luego, cuando la potencia decae casi por completo, a los 115 s, el error aumenta cercano a un 10 %, para a los 140 s alcanzar un error sobre el 35 %.

4. Conclusiones

4.1. Conclusión

De los fiber-optic bundles estudiados, se concluye que estos son sensibles al uso de conectores, ya que, en promedio al usar 1 conector entre 2 FOB, la transmisión tiene pérdidas cercanas al 50 %, y aumentan a un 70 % con 2 conectores, entre 3 FOB. A pesar de ello, el cálculo de temperatura alcanza un error del 2 %. Por otro lado, cuando los terminales presentan desalineamiento rotacional, su razón de transmitancia es superior a 0.9 en los casos de interés (0° , 20° , 30° , 40° , 60°), y el cálculo de temperatura presenta un error inferior al 3 %. En la prueba de desalineamiento respecto a una fuente de luz, a los 4° de desviación la potencia de la transmisión disminuye a la mitad, y se pierde casi en su totalidad a los 10° . El error en el cálculo de temperatura es inferior al 5 % hasta los 6° , y luego aumenta sobre el 10 %. En la prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente, el efecto de esta sobre la primera se hace notorio cuando estas están ligeramente desalineadas, ya que la potencia aumenta, más no así el error en el cálculo de temperatura, manteniéndose inferior a 2 % en todas las mediciones. En la prueba de revertir terminales, algunos FOB tienen una variación inferior al 15 % en el error porcentual absoluto del poder de emisión espectral en todas las longitudes de onda cuando se invierte su sentido, mientras que en otros casos, el error aumenta a valores como el 40 %, e incluso sobre el 80 %.

Por otro lado, en las pruebas de estrés mecánico, se confirma que la chaqueta protectora de acero que recubre las fibras, cumple la función de protegerlas, para las tres pruebas de estrés mecánico realizadas, de tracción, de flexión y de altas temperaturas, por lo que, una vez que la chaqueta es retirada, la sonda que cubre las fibras no las protege de igual manera. La ruptura de las fibras ocurre de manera gradual, ya que, a medida que va aumentando el parámetro del estrés, la potencia va decayendo poco a poco, hasta que alcanza el mínimo, lo que se traduce en la ruptura total de las fibras. Respecto al cálculo de temperatura, mientras hubo transmisión, el error de la temperatura calculada no superó el 10 %; pero en casos donde, el poder total de emisión espectral era bajo comparado al original, con valores muy cercanos a 0, con pérdidas cercanas al 95 %, el error aumenta considerablemente, alcanzando valores superiores al 30 %.

4.2. Trabajo a futuro

Replicar pruebas realizadas a fiber-optic bundles de otros proveedores, y con otras características, tales como un mayor número de núcleos, distinta distribución entre los núcleos, material de sus componentes con una distinta resistencia, ya sea mayor o menor. Realizar pruebas de pérdidas por uso de conectores con un mayor número de conectores, para verificar relación en el número de conectores y las pérdidas en la transmisión. Exponer conectores a vibraciones, causando mayor desviación en estos. Utilizar distintas fuentes de luz, para replicar pruebas de desviación respecto a estas, como por ejemplo utilizar 3 fuentes de luz, utilizar fuentes iguales, etc. Realizar otras pruebas de estrés mecánico, tales como torsión, torsión agregando cargas, pruebas de impacto, pruebas de compresión, fatiga cíclica, etc.

Bibliografía

- [1] “Fundamentals of Photonics”, B.E.A Saleh and M. C. Teich. Wiley-Interscience, 2007.
- [2] C. Pendão and I. Silva. “Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications” *Sensors*, vol. 22, no. 19, pp 7554, Oct. 2022
- [3] Ordóñez, Javier Luque. “Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico”. Manual formativo de ACTA 62 (2012): 17-31.
- [4] Ball, David W. “The Electromagnetic Spectrum: A History” *Spectroscopy*, 2007, vol. 22, no 3, p. 14.
- [5] “Transferencia de calor y masa”, Cengel, Yunus A., and Afshin J. Ghajar. Vol. 53. McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [6] J. Torres-Sanhueza, F. Rivas, F. G. Pérez, R. Parra, S. N. Torres and S. E. Godoy, “Radiometric Methods for High Temperature Flame Estimation: Robustness Analysis and Application to an Industrial Flash Smelting Furnace”, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023, Art no. 9511413, doi: 10.1109/TIM.2023.3302381.
- [7] “Introduction to Fiber Optics”, A. Ghatak and K. Thyagarajan, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006.
- [8] Angel Vega, “Láser de fibra óptica de fluorozirconato con emisión en el espectro visible”, Tesis, Maestro en Ciencias, 2017, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- [9] Dr. Rüdiger Paschotta, “Multimode Fibers”, RP Photonics Encyclopedia, https://www.rp-photonics.com/multimode_fibers.html, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [10] Meet Optics, “Optical Fiber Loss and Attenuation”, Meet Optics, <https://www.meetoptics.com/academy/optical-fiber-loss>, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [11] Samruddha Parkar, “Losses in optical fiber”, Presentación de L&T, 2013.
- [12] “SMA905 Connectors: Multimode, Stainless Steel Ferrule”, ThorLabs, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1383&pn=10850A, accedido el 13 de diciembre de 2024.

- [13] “10850A - Standard SMA905 Multimode Connector, Ø850 μm Bore, SS Ferrule”, ThorLabs, <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=10850A>, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [14] “Fiber Optic Mating Sleeves and Bulkhead Adapters”, ThorLabs, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=314, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [15] Noemí Merayo, “Estudio de las Pérdidas por Desalineamiento en la Fibra Óptica”, Universidad de Valladolid, 2005.
- [16] A. Berganza, G. Aldabaldetrekú, J. Zubia, G. Durana and J. Arrue, “Misalignment Losses in Step-Index Multicore Plastic Optical Fibers,” in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 13, pp. 2177-2183, July1, 2013, doi: 10.1109/JLT.2013.2263634.
- [17] P. K. Mallick, “Testing the fatigue strength of fibers used in fiber-reinforced composites using fiber bundle tests”, University of Michigan-Dearborn, USA, 2011.
- [18] G. S. Glaesemann, “Optical Fiber Mechanical Reliability: Review of Research at Corning’s Optical Fiber Strength Laboratory,” White Paper WP8002, Corning Inc., July 2017.
- [19] “Extractive Metallurgy of Copper”, W.G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas, Pergamon, 2002.
- [20] “Ventajas y desventajas de las termocuplas”, Fluke, <https://fluke.com.ar/blog/article/ventajas-y-desventajas-de-las-termocuplas>, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [21] “La fibra óptica sirve para medir temperatura y otras magnitudes”, E-Medida, <https://fluke.com.ar/blog/article/ventajas-y-desventajas-de-las-termocuplas>, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [22] “Sobre Nosotros”, RS2Mining, <https://rs2mining.com/sobre-nosotros/#que-hacemos>, accedido el 13 de diciembre de 2024.
- [23] RS2M, “Daños Típicos de Fiber Bundles de Sensores Optoelectrónicos”, Reporte ID: RSM2_FIBRAS_2024_v1, 2024.

A. ANEXO: Registro completo de pruebas

A.0.1. Prueba de pérdidas por conectores

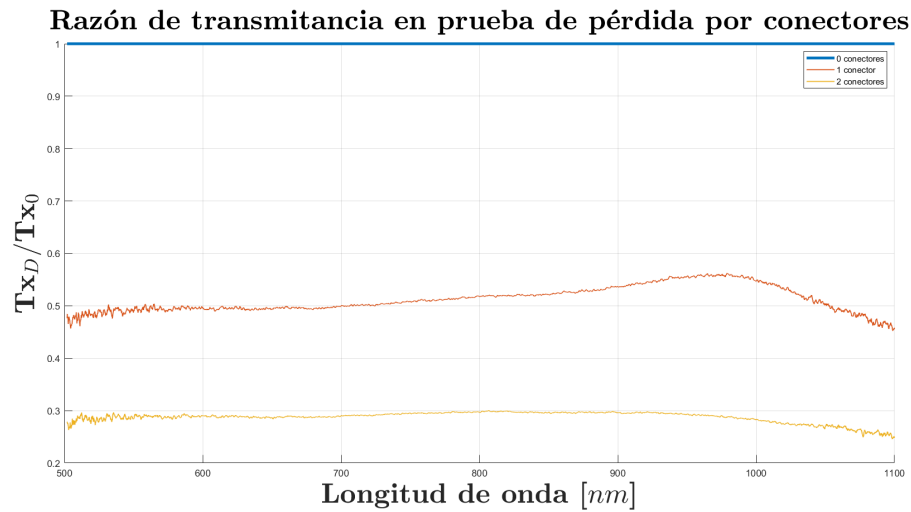


Fig. A.1: Razón de transmitancia en prueba de pérdidas por conectores en función del número de conectores utilizados.

Tabla A.1: Resultados de prueba de pérdidas por uso de conectores.

Nº medición	Nº conectores	Descripción	Poder de emisión total [mW/cm^2]	Temperatura calculada [K]	2 λ [nm]
1	0	1[m]	6124.4	1929.9	600 y 700
2	0	2[m]	5871.6	1911.1	600 y 700
3	1	1[m] - 1[m]	2267.2	1937.7	600 y 700
4	1	1[m] - 2[m]	3137.2	1865.8	600 y 700
5	1	1[m] - 2[m]	3948.9	1880.5	600 y 700
6	2	1[m] - 1[m] - 1[m]	1390.7	1938.9	600 y 700
7	2	1[m] - 2[m] - 1[m]	1752.8	1916.9	600 y 700
8	2	2[m] - 1[m] - 2[m]	1295.4	1885.9	600 y 700
9	2	2[m] - 2[m] - 2[m]	2376.4	1920.8	600 y 700

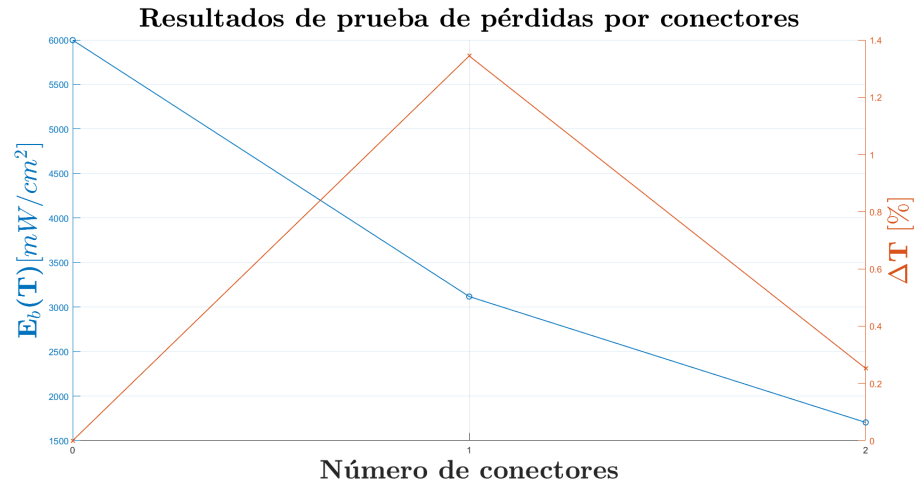


Fig. A.2: Resultados de poder de emisión total y error de temperatura calculada en prueba de pérdidas por conectores.

Tabla A.2: Resultados promedio de prueba de pérdidas por uso de conectores.

N° conectores	Poder de emisión total promedio [mW/cm ²]	Pérdidas promedio (%)	Pérdidas promedio (dB)	T° calculada promedio [K]	Error T° calculada [%]
0	5998.0	-	-	1920.5	-
1	3117.8	48.02	2.84	1894.7	1.34
2	1703.8	71.59	5.47	1915.6	0.25

A.0.2. Prueba de desalineamiento rotacional

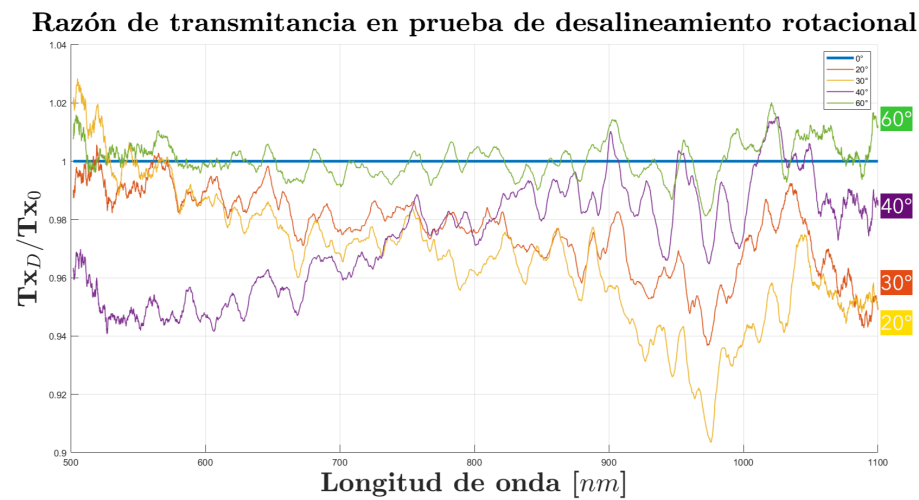


Fig. A.3: Razón de transmitancia en prueba de desalineamiento rotacional en función del ángulo de desviación, para los casos de 0°, 20°, 30°, 40° y 60° en sentido horario.

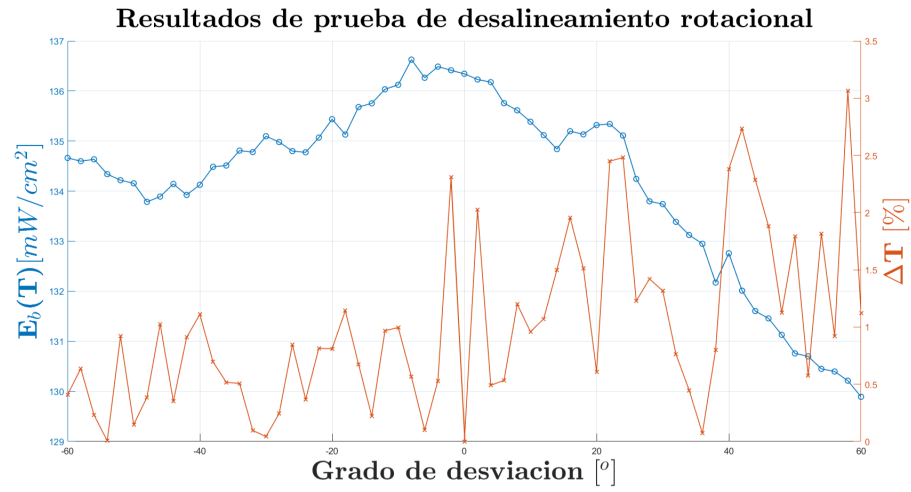


Fig. A.4: Resultados de poder de emisión total y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento rotacional.

A.0.3. Prueba de desalineamiento respecto a una fuente

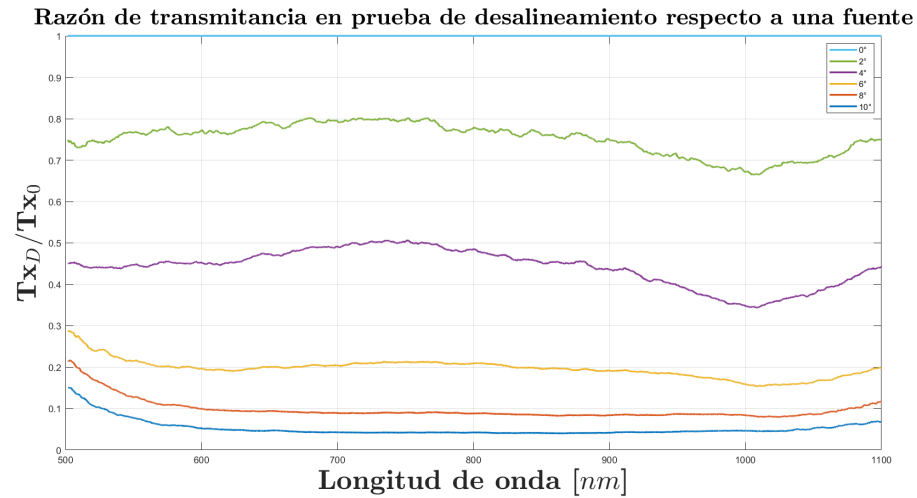


Fig. A.5: Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una fuente en función del ángulo de desviación, para los casos de 0°, 2°, 4°, 6°, 8° y 10° en sentido horario.

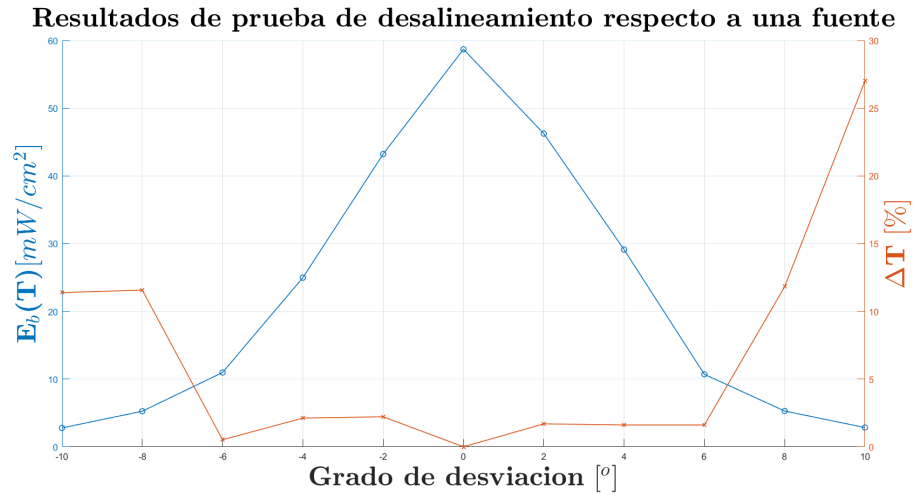


Fig. A.6: Resultados de poder de emisión total y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una fuente.

Tabla A.3: Resultados obtenidos en prueba de desalineamiento respecto a una fuente.

Ángulo de Desviación [°]	Pérdidas Poder de Emisión Total (%)	Pérdidas [dB]	Temperatura calculada [K]	Error en T calculada [%]
-10	95.25	13.23	2223.5	11.39
-8	91.05	10.48	2227.2	11.57
-6	81.30	7.28	2006.6	0.52
-4	57.45	3.71	1953.9	2.12
-2	26.37	1.33	1951.9	2.22
0	-	-	1996.2	-
+2	21.21	1.03	1062.4	1.69
+4	50.40	3.04	1964.0	1.61
+6	81.77	7.39	2028.4	1.61
+8	90.99	10.45	2232.3	11.83
+10	95.16	13.15	2535.4	27.01

A.0.4. Prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz

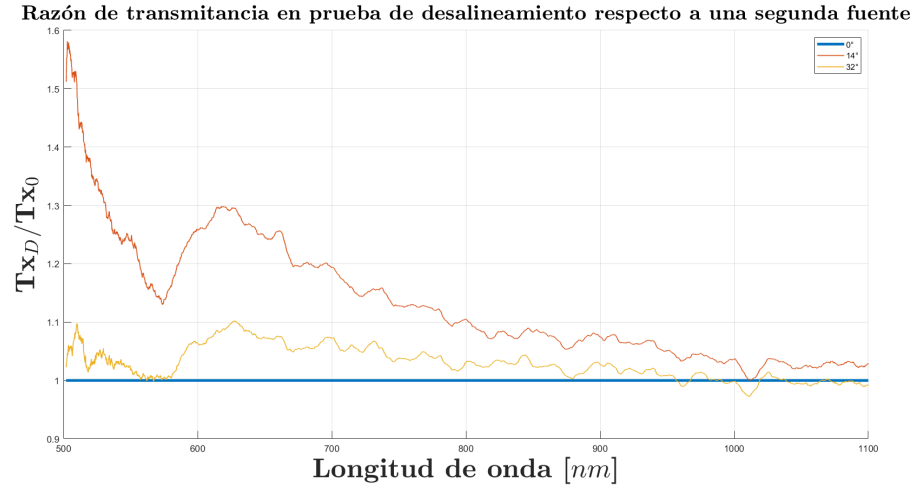


Fig. A.7: Razón de transmitancia espectral en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz, en función del grado de desalineamiento de ésta, para 0° , 14° y 32° de desviación.

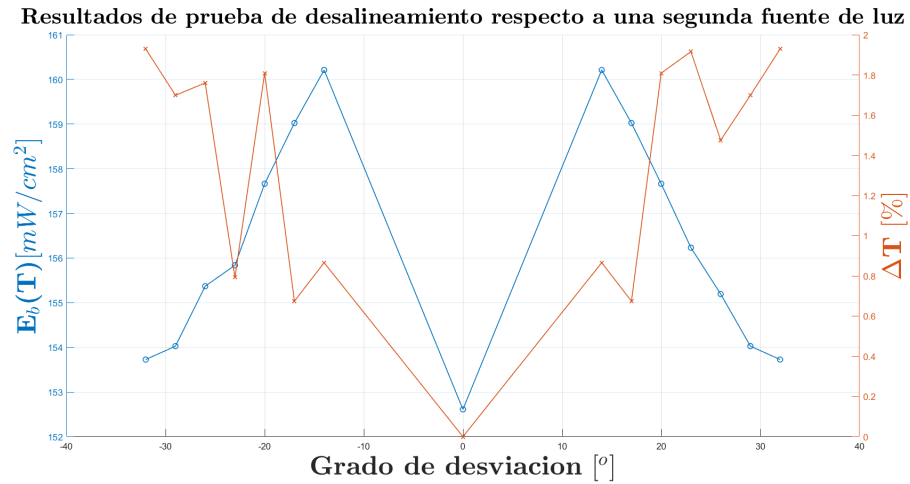


Fig. A.8: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de desalineamiento respecto a una segunda fuente de luz.

Tabla A.4: Resultados obtenidos en prueba de desalineamiento respecto a a una segunda fuente de luz.

Ángulo de Desviación [°]	Poder de Emisión Total [mW/cm^2]	Temperatura calculada [K]	Error en T° calculada [%]
-32	153.72	1581.3	1.92
-29	154.02	1585.0	1.69
-26	155.37	1584.0	1.76
-23	155.84	1599.6	0.79
-20	157.66	1583.2	1.80
-17	159.02	1601.5	0.67
-14	160.21	1626.3	0.86
0	152.61	1612.4	-

A.0.5. Revertir terminales

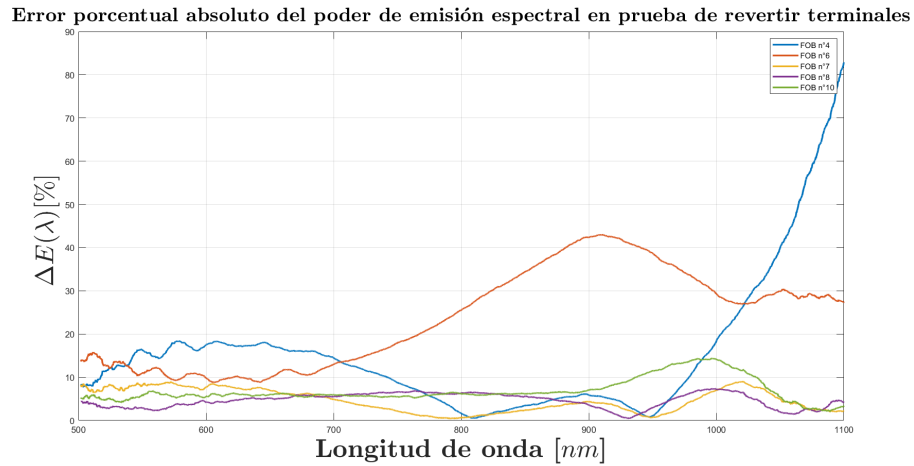


Fig. A.9: Error porcentual absoluto del poder de emisión espectral en prueba de revertir terminales para los fiber-optic bundles n° 4, 6, 7, 8 y 10.

A.0.6. Tracción

Documentación para FOB n°4:

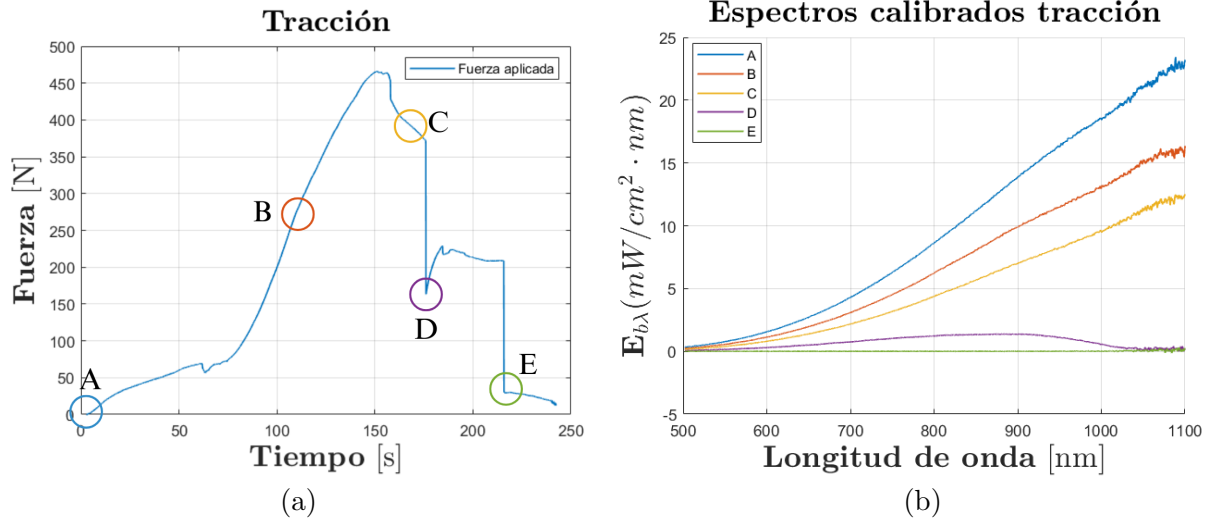


Fig. A.10: Fuerza y espectros en prueba de tracción.

(a) Fuerza [N] v/s duración de la prueba [s]; (b) Espectros en distintos puntos de prueba de tracción.

Donde los puntos corresponden a los tiempos bajo tracción: A: 0 s, B: 109 s, C: 175 s, D: 176 s, E: 216 s.

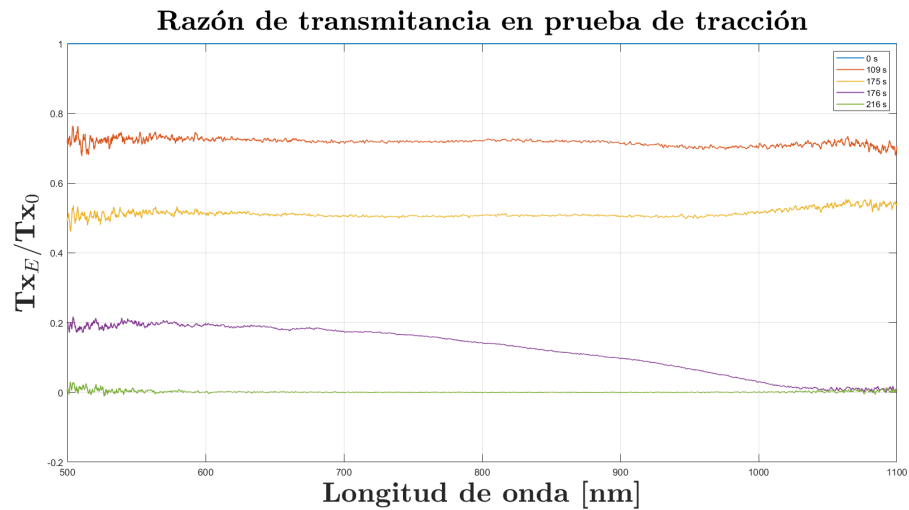


Fig. A.11: Razón de transmitancia en prueba de tracción en función de la duración de la prueba, en puntos cruciales.

Tabla A.5: Resultados de fuerza, poder total de emisión espectral, temperatura calculada, y error de temperatura calculada en puntos cruciales de prueba de tracción.

Punto	Fuerza [N]	Poder total de emisión espectral [mW/cm^2]	Pérdidas [%]	T° calculada [K]	Error en T° calculada [%]
A	0	5874.9	-	1898.0	-
B	270.72	4185.3	28.7	1914.2	0.85
C	386.35	3034.2	48.3	1934.7	1.94
D	166.57	433.1	92.6	2045.9	7.79
E	31.22	-	100	-	-

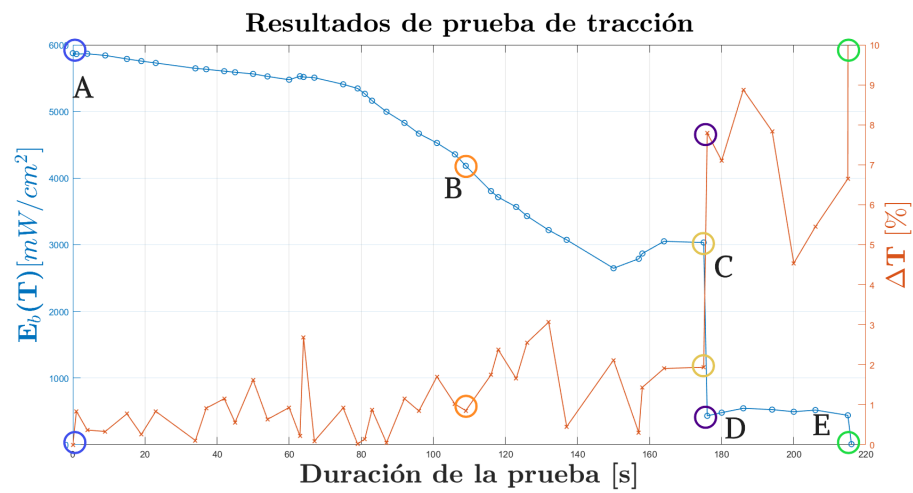


Fig. A.12: Resultados de poder total de de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de tracción.

También se documentó para los FOB n° 2 y 5:

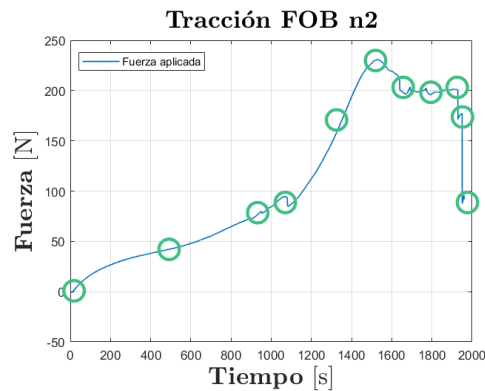


Fig. A.13: Fuerza aplicada a FOB 2.

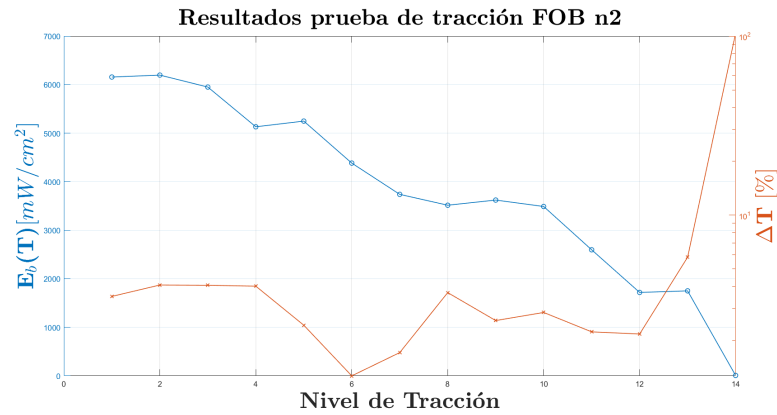


Fig. A.14: Resultados tracción FOB 2.

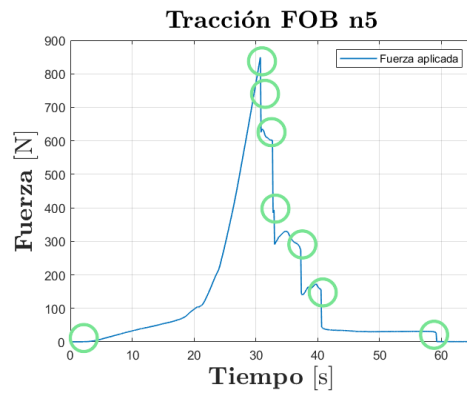


Fig. A.15: Fuerza aplicada a FOB 5.

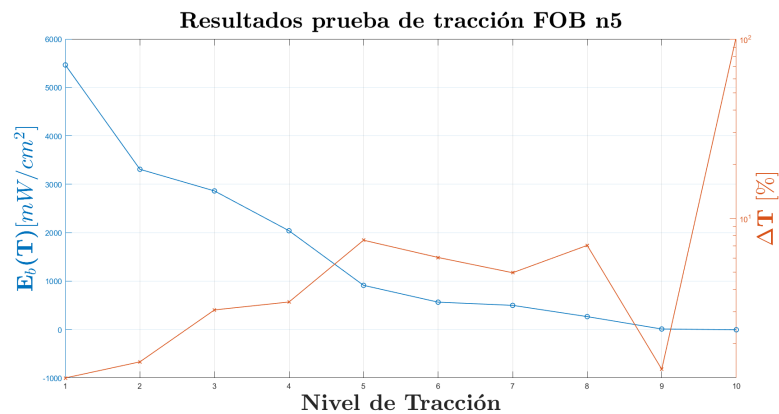


Fig. A.16: Resultados tracción FOB 5.

También se replicó la prueba para un conector. Por temas de agarre a la máquina de tracción, se soldó una pieza a una tapa protectora de un conector, la cual va enroscada a este, tal como se ve en la Figura A.17 . La prueba no mide transmisión, sólo busca probar la resistencia del

conector ante una fuerza de tracción. Por temas prácticos, se realizó una sola vez, obteniendo que la fuerza máxima antes de la ruptura tiene un valor de 2219,810 N. A este valor, el conector no sufrió daños, por lo que se concluye que este soporta una fuerza de tracción más alta.



Fig. A.17: Conector traccionado

A.0.7. Flexión

La prueba documentada en el informe corresponde al fiber-optic bundle n°1.

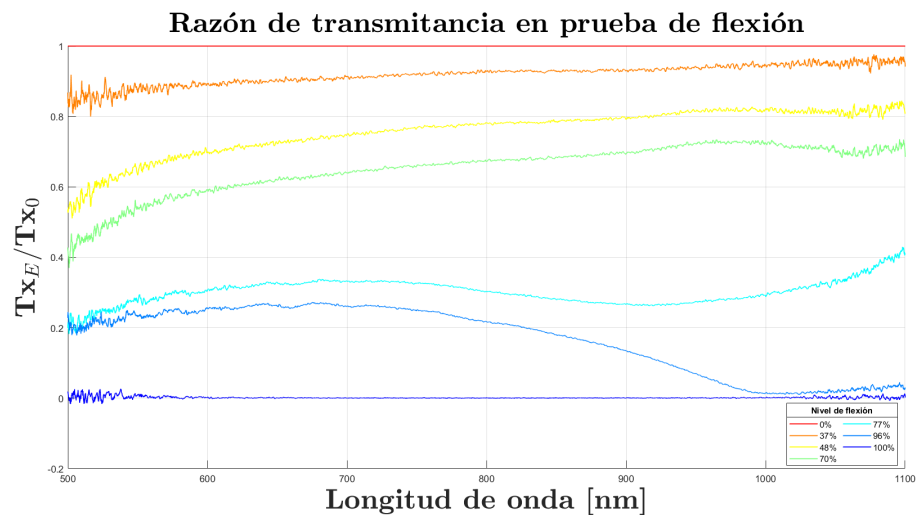


Fig. A.18: Razón de transmitancia en prueba de flexión en distintos niveles de flexión, en FOB n°1

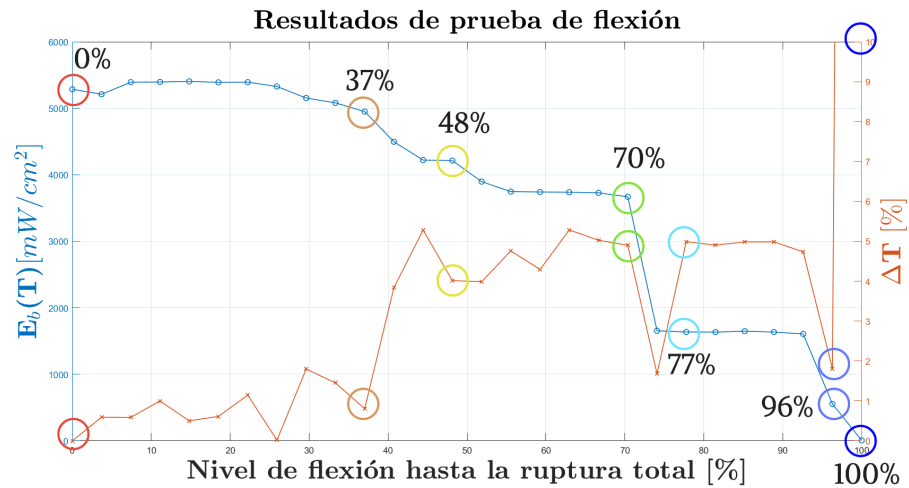


Fig. A.19: Resultados de poder total de emisión espectral y error de temperatura calculada en prueba de flexión, en FOB n°1

Tabla A.6: Resultados obtenidos en prueba de flexión para algunos puntos, del FOB n°1.

Nivel de flexión [%]	Poder total de emisión espectral [mW/cm^2]	Temperatura calculada [K]	Error en T° calculada [%]
0	5285	1884.6	-
48	4213.3	1809.0	4.015
77	1636.4	1790.6	4.99
100	0	-	-

A continuación se presentan resultados para FOB n°4:

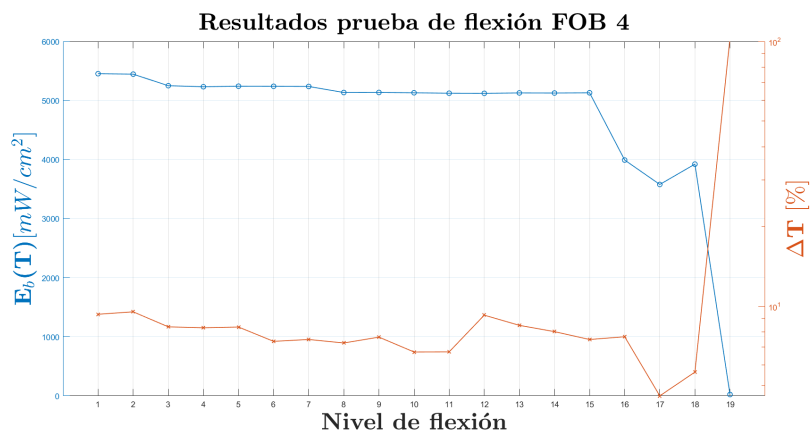


Fig. A.20: Resultados flexión FOB n°4

A.0.8. Prueba altas temperaturas

Tabla A.7: Fiber-optic bundles luego de ser sometido a altas temperaturas a distintas distancias y temperaturas, durante 2 minutos.

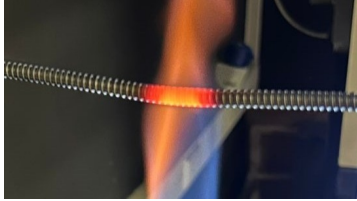
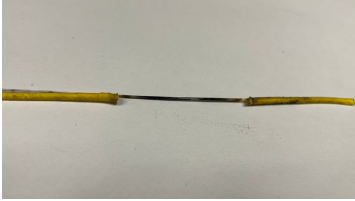
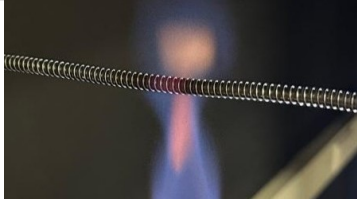
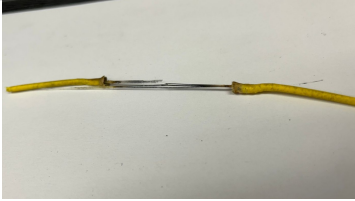
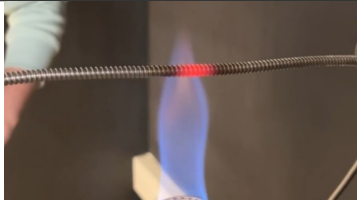
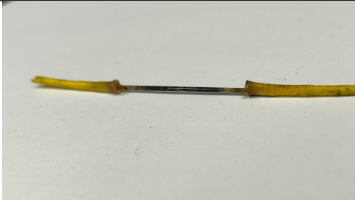
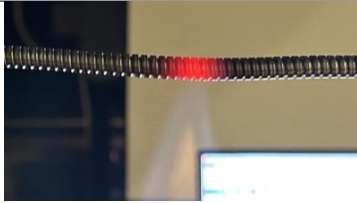
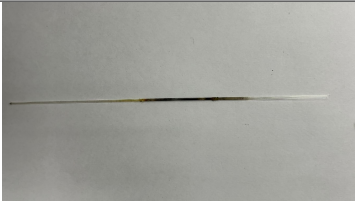
Distancia a punta del mechero [cm]	Chaqueta quemada	Fiber-optic bundle quemado	Temperatura promedio [°C]
7			391 ($\sigma=7.79$)
8			365 ($\sigma=11.36$)
9			349 ($\sigma=16.82$)
10			333 ($\sigma=60.47$)
11			237 ($\sigma=4.95$)
12			202 ($\sigma=2.12$)

Tabla A.8: Resultados de distintas chaquetas de FOB expuestas a altas temperaturas.

N° FOB	Distancia a punta del mechero [cm]	Tiempo expuesto a llama [s]	T° prom. [°C]	Estado final de FOB
7	10	150	333	Dañado
8	6	600	400	Dañado
9	9	30	349	Sin daño
9	9	60	349	Dañado
10	11	180	237	Sin daño
10	8	360	365	Dañado

