



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

RED LOCAL ÓPTICA ESPECIALIZADA PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS  
ESTRUCTURALES EN EDIFICACIONES

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
DAVID ANTONIO HERNÁNDEZ REYES

TUTOR PRINCIPAL  
DR. SERGIY KHOTYAINITSEV  
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.  
OCTUBRE, 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Oleksandr Martynyuk

Secretario: Dr. Miguel Flores Moctezuma

1er Vocal: Dr. Sergiy Khotyaintsev

2do. Vocal: Dr. Oleg Kolokolsev

3er. Vocal: Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Sergiy Khotyaintsev



-----  
**FIRMA**

## Agradecimientos

A mis padres, Antonio y María, siempre impulsándome a seguir adelante, dando su cariño y consejo en todo momento.

A mis hermanos, Luigi y Jonathan, bromeando y apoyándome desde pequeños.

A mi abuela María, siendo una segunda madre, siempre al pendiente de mí y dando su cariño incondicionalmente.

A mi tutor, Dr. Sergiy Khotyaintsev, por otorgarme su confianza, paciencia y conocimientos, conjugando el sentido académico y humano en todo momento.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente al Posgrado de Ingeniería, por la oportunidad que se me concedió para realizar mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

A la DGAPA - PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de proyecto de innovación tecnológica “Sistema de fibra óptica para la detección automática de daños estructurales a edificios en tiempo real, especializado para la detección de daños críticos causados por terremotos y otros eventos catastróficos” con número de referencia IT102021.

En memoria de mi tío Elvis Hernández y mi abuelo Joel Hernández.

## Contenido

Agradecimientos .....	II
Resumen .....	V
Abstract.....	VI
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivo general.....	4
1.3 Objetivos específicos.....	4
1.4 Metodología.....	5
1.5 Referencias.....	6
Capítulo 2. Estado del Arte .....	7
2.1 Monitoreo de estructuras.....	7
2.2 Elementos dentro de la red .....	7
2.2.1 Fibra óptica .....	7
2.2.2 Aisladores y Circuladores .....	13
2.2.3 Acopladores/divisores de haz .....	13
2.2.4 Filtros .....	14
2.2.5 Elementos activos de líneas y redes de fibra óptica .....	15
2.2.6 Fuentes.....	15
2.2.7 Detectores.....	17
2.2.8 Amplificadores .....	17
2.2.9 Moduladores.....	18
2.3 Elementos de una red de sensores de fibra óptica.....	19
2.3.1 Sensores de fase (interferometría) .....	19
2.3.2 Sensores de intensidad .....	21
2.3.3 Sensores basados en Rejillas de Bragg.....	21
2.3.4 Análisis de los sistemas existentes de monitoreo con base en sensores ópticos.....	22
2.4 Trabajo previo realizado en la UNAM .....	24
2.5 Integración de las redes de sensores con distintas redes de comunicaciones.....	25
2.6 Conclusiones del capítulo .....	27
2.7 Referencias.....	28
Capítulo 3. Propuesta conceptual de sistema de monitoreo daño estructural en líneas del metro.....	30

3.1 Propuesta conceptual de monitoreo de daños estructurales a las líneas de metro de la Cd. de México.....	30
3.1.1 La sismicidad en la Ciudad de México y post evaluación de edificios en caso de sismos.....	30
3.1.2 Propuesta de sistema de monitoreo.....	32
3.2 Análisis cuantitativo de las características principales de la red de monitoreo de algunas líneas del metro de la Cd. de México.....	37
3.2.1 Análisis de la operación pulsada de emisores de luz.....	41
3.2.2 Sistema de alerta de la red de monitoreo.....	44
3.2.3 Topología de red de monitoreo e interconexión.....	46
3.3 Conclusiones del capítulo.....	48
3.4 Referencias.....	50
Capítulo 4. Análisis de la elongación y fuerza de rotura de las fibras ópticas.....	52
4.1 Factores implícitos en la rotura de la fibra óptica bajo tracción.....	52
4.2 Prueba de tensión aplicada a fibras ópticas después de su manufactura (tensile proof test).....	54
4.2.1 Características estadísticas de los datos obtenidos en las pruebas de tensión.....	56
4.3 Rotura de fibra óptica como un indicador de agrietamiento estructural.....	58
4.3.1 Estimación de fuerza de rotura en fibras ópticas según tipo y parámetros de fibra.....	58
4.3.2 Estimación de ancho de grieta en correlación con fibra empleada.....	65
4.4. Conclusiones del capítulo.....	69
4.5 Referencias.....	70
Capítulo 5. Diseño del experimento, implementación de la instalación experimental y resultados.....	72
5.1.1 Experimentos para fibras de 6 y 12 metros de longitud de fibra SMF-28.....	72
5.1.2 Distribución de Weibull para experimentos.....	73
5.1.3 Variación de intervalos y reducción de rangos como validación de aproximación a distribución de probabilidad acumulada de Weibull $F_{WD}$ .....	77
5.2 Distribuciones de probabilidad acumulada de Weibull $F_{WD}$ para fibra SMF 28 cortas (0.3 m).....	78
5.3 Análisis estadístico de resultados de fibra SMF 28 con 30 cm de longitud.....	83
5.4 Reducción de rango para fibra smf-28 de 30 cm de longitud.....	91
5.5 Resultados de experimentación fibra largas (12 y 6 metros de longitud).....	95
5.6 Discusión.....	105
5.7 Conclusiones.....	107
Conclusiones generales.....	109

## Resumen

Este trabajo propone y analiza las formas de implementar una red de monitoreo de daños estructurales en estaciones y líneas con tramos elevados del sistema de metro colectivo en la Ciudad de México. Partiendo de una investigación del estado actual de las redes de telecomunicaciones y sensores ópticos, se proyecta su potencial para el desarrollo e implementación de una red óptica especializada para este fin. Se considera que esta red será de gran utilidad para alertar a las autoridades y usuarios sobre daños peligrosos en los tramos. Además, se espera que en el futuro esta red se integre al Internet de las cosas, así como a la infraestructura de la Ciudad inteligente.

En esta red se utilizará fibra óptica como medio de transmisión de señales e información, así como sensor de daños estructurales.

Se consideraron diferentes topologías de red y diferentes tipos de fibras ópticas, y se llevó a cabo un análisis comparativo de los presupuestos de potencia óptica de la red y el costo monetario de diferentes variantes de implementación de todo el sistema de monitoreo.

Asimismo, se realizó un estudio experimental del esfuerzo máximo y elongación máxima soportada por la fibra óptica monomodal SMF-28 y se verificó la correlación del comportamiento experimental con el del modelo teórico probabilístico de Weibull.

Finalmente, se realizó una comparación de los resultados experimentales con las estimaciones obtenidas en este trabajo en base a varios modelos teóricos existentes.

## Abstract

This paper proposes and analyzes the ways of implementing a monitoring network for structural damage to stations and lines with elevated sections of the collective metro system in Mexico City. Starting from an investigation of the current state of telecommunications and optical sensor networks, its potential for the development and implementation of a specialized optical network for this purpose is projected. It is considered that this network will be very useful to alert authorities and users about dangerous damage to sections. In addition, it is expected that in the future this network will be integrated into the Internet of things, as well as the infrastructure of the Smart City.

In this network, fiber optics will be used as the means of transmitting signals and information, as well as the structural damage sensor.

Different network topologies and diverse types of optical fibers were considered, and a comparative analysis of network optical power budgets and the monetary cost of different implementation variants of the entire monitoring system was carried out.

Likewise, an experimental study of the maximum stress and maximum elongation supported by the SMF-28 monomodal optical fiber was carried out and the correlation of the experimental behavior with that of Weibull's theoretical probabilistic model was verified.

Finally, a comparison of the experimental results was made with the estimates obtained in this work based on various existing theoretical models.



## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

Nuestro país sufre frecuentemente de actividad sísmica, la cual ha traído en innumerables ocasiones pérdida de inmuebles y vidas. Debido a la ubicación geográfica de México y en concreto de la Ciudad de México se tienen constantemente sismos debido a las interacciones entre las placas de corteza terrestre en las que se sitúa la ciudad. Anteriormente se han vivido catástrofes ocasionadas tanto por el mal planeamiento de los edificios y estructuras, como por el impacto de los sismos a estas.

El hecho más reciente viene de la pérdida de vidas y transporte público en la línea 12 del sistema colectivo metro de la Ciudad de México, ocasionado por la mala ejecución de la obra civil en la construcción de los tramos elevados y la falta de monitoreo de salud estructural a lo largo de la línea.

Partiendo de esta premisa, el desarrollo, perfeccionamiento e implementación masiva de las técnicas de detección temprano de daño a las edificaciones debe ser una meta para evitar siniestros.

Anteriormente se utilizaban equipos mecánicos y electromecánicos para realizar monitoreo de estructuras, que debido a la complejidad de su instalación y al costo de estos han quedado desplazados con tecnologías novedosas y de mayor facilidad tanto en su incorporación a las estructuras como en su monitoreo, dentro de estas tecnologías se desarrollaron técnicas con base en fibra óptica.

La fibra óptica llegó a revolucionar las telecomunicaciones ofreciendo tasas de transmisión mayores a las ya manejadas en otros medios de transmisión empleados en las redes, por lo cual se ha utilizado en redes domesticas de tipo FTTH (Fiber To The Home) hasta enlaces de gran capacidad en largas distancias (Long Haul).

Características de la fibra óptica [1]:

- Inmunidad Electromagnética
- Alta resistencia a factores ambientales
- Bajo costo
- Bajas pérdidas
- Gran ancho de banda
- Capacidad para expansión de red

Con las características de la fibra se ha dado paso al uso en otras áreas de actividad humana como tecnología basada en fibra óptica, así mismo, la integración de esta tecnología con otras existentes ha dado paso a sin fin de aplicaciones, entre ellas las redes de sensores.

La tecnología de redes de sensores en fibras ópticas se ha desarrollado desde hace unas décadas hasta la actualidad logrando avances importantes. En particular, dentro de los dispositivos empleados como sensores de desplazamiento mecánico se encuentran las rejillas de Bragg (FBG), el Resonador de Fabry Perot (FPR) y sensores de intensidad.

Además, en estas redes de sensores se ha empleado el Análisis en el Dominio de Tiempo de Esparcimiento de Brillouin (BOTDA) o mismos sistemas basados en retro esparcimiento Rayleigh (OTDR) con características especiales para su uso en elementos estructurales.

Adicionalmente, el uso de la fibra óptica se ha dado tanto en la industria aeroespacial como en la petrolera/civil, existen diversos sistemas de monitoreo de líneas de gas y agua, así como de monitoreo de piezas para su uso aeroespacial dada la ligereza y fácil integración a estas estructuras.

Sin embargo, el uso de dichas técnicas tiene un alto costo de equipo óptico y electrónico con que implementan las redes de estos sensores. En este trabajo se considera y se analiza los sensores de fibra óptica alternativos que se describe a continuación un sistema alternativo relativamente sencillo y de bajo costo.

Para este proyecto, sigue la línea de trabajo de etapas anteriores donde se ocupó a la fibra óptica de sílice como testigo de daño estructural en edificaciones de mampostería con anterioridad se estudió el anclaje de la fibra en mampostería y se realizaron experimentos de tracción mayoritariamente con fibra mono modal, dando resultados novedosos que fueron publicados en revistas indexadas y que dieron paso a nuevos objetivos en la investigación de esta tesis [2].

En este trabajo se plantea un sistema de monitoreo para el sistema colectivo metro en sus líneas con tramos elevados. También, se estudia a la fibra óptica monomodal en ensayos de tensión y elongación máxima con longitudes varias a manera de obtener datos experimentales que ayuden a la implementación del sistema de monitoreo.

### 1.2 Objetivo general

Proponer y analizar un sistema de monitoreo de daño estructural en el sistema colectivo metro utilizando fibra óptica como el medio de transmisión de la red y como sensor distribuido de fisuras y grietas, así como investigar teórica y experimentalmente la fuerza de rotura y elongación máxima soportada por la fibra óptica monomodal.

### 1.3 Objetivos específicos

1. Analizar el estado de arte en el área de redes ópticas de sensores y diversos dispositivos ópticos que se usan en dichas redes.
2. Proponer un sistema de monitoreo en base de fibra óptica como sensor distribuido de fisuras y grietas para monitorear la salud estructural en las líneas con tramos elevados del metro de la Ciudad de México.
3. Analizar factores que afectan la fuerza de tensión y elongación que la fibra óptica puede soportar.
4. Obtener teórica y experimentalmente datos sobre la fuerza de tensión máxima y elongación debida al esfuerzo de algunos tipos de las fibras ópticas de sílice derivados de ensayos de tracción destructivos y compararles con resultados teóricos y experimentales existentes.
5. Correlacionar fuerza de tensión de la fibra óptica y elongación empleando fibra óptica de sílice.

### 1.4 Metodología

Este trabajo se compone de dos fases teóricas y una fase experimental.

#### Etapa 1. Investigación sobre estado del arte en comunicaciones ópticas y SHM

En esta primera etapa se realizó una investigación del estado del arte sobre dispositivos ópticos para telecomunicaciones, así como para monitoreo de salud estructural y su implementación en el monitoreo de salud estructural por medio del internet de las cosas en forma de edificios inteligentes y nuevas tecnologías.

#### Etapa 2. Análisis de redes ópticas y factores de rotura de fibra

Se realizó un desglose de redes ópticas para su uso potencial en esta red, previendo desde la topología hasta el tipo de dispositivos ópticos a utilizar, conociendo previamente el uso y ventajas de cada dispositivo.

Se analiza a la fibra óptica como medio testigo para su uso en estructuras, realizando análisis de factores que causan su rotura, se analizan las pruebas realizadas en su manufactura y su certificación.

#### Etapa 3. Experimentación con fibras ópticas.

Se enfoca en la fuerza que provoca la rotura de una fibra óptica de sílice y que esta a su vez sea utilizada como elemento testigo de daño estructural en edificaciones, y correlacionar estas variables mediante un estudio estadístico.

Con base en los resultados de la etapa 2, se desarrolló un experimento sometiendo la fibra óptica a pruebas de tracción y tensión para obtener fuerza de rotura de fibras ópticas y anchos de grietas soportados, además, se estimará la fuerza de tensión para su rotura y se realizará un análisis estadístico para comprobar dichas estimaciones.

## Capítulo 1: Introducción

Dentro de estas pruebas se registró la elongación presentada en la fibra debido a la tensión aplicada en esta, tomando como base el comportamiento de los cerámicos y vidrios, su curva de esfuerzo-deformación y comparándola con resultados experimentales de publicaciones similares y resultados teóricos calculados.

### 1.5 Referencias

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*, Rochester, NY: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] A. Hurtado de Mendoza-Lopez, S. Khotyaintsev, H. Guzman-Holguin, D. Hernandez-Reyes, J. Lopez-Mancera y M. Zuñiga-Bravo, «Application of fiber optic light guides with quartz core and cladding and plastic coating as indicators of the emergence of cracks in brickwork,» *Journal of Optical Technology*, vol. 87, nº 2, pp. 82-87, 2020.

## Capítulo 2. Estado del Arte

### 2.1 Monitoreo de estructuras

Desde siempre el ser humano ha tenido la necesidad de vivienda e infraestructura, debido a la diversidad de ecosistemas y de climas en general, las edificaciones cambian dependiendo de la ubicación geográfica, pero lo constante en la mayoría de los lugares es el uso de mampostería y concreto debido a sus propiedades mecánicas de alta resistencia.

Hasta hace algunas décadas el monitoreo de estructuras no tenía relación con la tecnología de fibra óptica, siendo esta exclusiva para su uso en telecomunicaciones, sin embargo, debido a su asequibilidad y capacidad de integración con otras tecnologías se ha convertido en una variante importante en la rama de instrumentación.

Dentro de la tecnología que involucra a la fibra óptica se han adaptado para el monitoreo de salud estructural (SMH por sus siglas en inglés). Los dispositivos mayormente encontrados en la práctica son los sensores basados en retro esparcimiento, modulación de intensidad y fase de onda y de filtrado de longitudes de onda que varían dependiendo de su tensión, temperatura, etc.

### 2.2 Elementos dentro de la red

En cualquier red se requieren de diversos elementos para tareas específicas dentro de la red, en el caso concreto de una red óptica, se pueden dividir en dos elementos: activos y elementos pasivos, siendo la diferencia el que necesiten o no alimentación externa a la propia red, en las siguientes secciones se habla estos elementos y su funcionalidad dentro del sistema.

#### 2.2.1 Fibra óptica

Es el componente principal de redes ópticas, pues es el medio de transmisión de la luz.

Con el desarrollo de las comunicaciones se han diseñado y creado nuevas fibras ópticas que atienden a diversos requerimientos en la industria, a continuación, se presentan algunas de las fibras más utilizadas [1].

2.2.1.1 Fibras ópticas multimodal

Fueron las primeras fibras ópticas creadas para la transmisión de datos por medio de ondas electromagnéticas luminosas, se utilizan en la banda de 850 nm principalmente, estas fibras forman se encuentran principalmente hechas de sílice (SiO<sub>2</sub>), y cuentan con las siguientes medidas, aunque estas pueden varias dependiendo de su construcción y tecnología de creación.

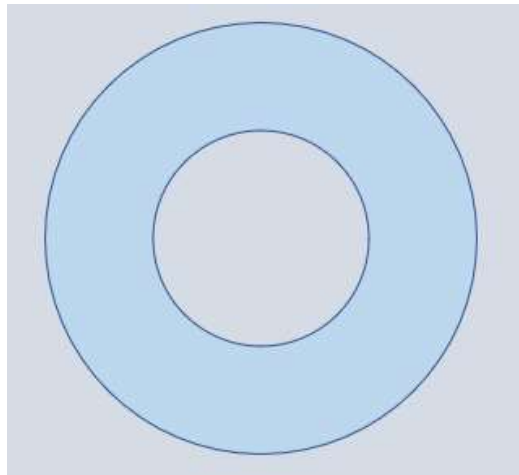


Figura 2.1 Sección transversal fibra óptica multimodal 62.5/125  $\mu\text{m}$

**Tabla 2.2 Características de fibra óptica multimodal 62.5/125 Corning Inc. [2]**

Especificación	Valores nominales de la fibra
Diámetro de núcleo	62.5 $\mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	125 $\mu\text{m}$
Apertura numérica	0.14 - 0.22
Dispersión	17 ps/ nm*Km
Atenuación	0.5 dB/Km @1300 nm

Se les conoce como multimodales porque en la transmisión de la señal pueden existir diversos modos o velocidades de propagación de grupo que pueden coexistir en la fibra óptica, siendo el



modo fundamental. La aplicación de estas fibras ópticas se dio en un inicio para comunicaciones ópticas, además de en años recientes ser utilizada en sistemas ópticos de sensores.

*2.2.1.2 Fibras ópticas de modo único*

Al contrario de las fibras multimodales, se diseñaron estas otras como alternativa a la fibra para las tres principales ventanas de propagación en la actualidad, teniendo como objetivo tener un solo modo de propagación en la fibra óptica en cuestión, estas fibras son hechas de sílice con un recubrimiento de sílice dopada con tierras raras u algún otro elemento dopante al sílice, lo cual da como resultado un índice de refracción más bajo que en el núcleo de la fibra, teniendo en cuenta esto, la transmisión se da en las bandas de 1310 nm , 1550 nm y 1625 nm, siendo las últimas dos bandas las utilizadas en el estado del arte y en las transmisiones de ultra alta velocidad hablando de cientos de Tb/s.

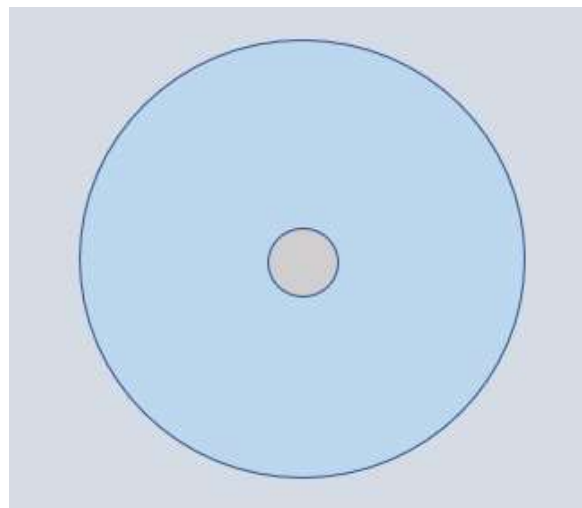


Figura 2.2 Sección transversal fibra óptica monomodal

Tabla 2.3 Características de fibra óptica monomodal SMF 28 e+ de Corning Inc. [3]

Especificación	Valores nominales de la fibra
Diámetro de núcleo	8.2 $\mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	125 $\mu\text{m}$
Apertura numérica	0.14
Dispersión	17 ps/ nm*Km
Atenuación	0.17 dB/Km @1550 nm

### 2.2.1.3 Fibras ópticas de cristal fotónico

Son fibras ópticas con un núcleo central de sílice que tienen periódicamente núcleos de algún otro medio, como lo puede ser el aire, está fibra generalmente son de costo elevado, el uso de este tipo de fibras va enfocado a mantener polarización y perdidas bajas, así como mermar el efecto de las no linealidades en la fibra.

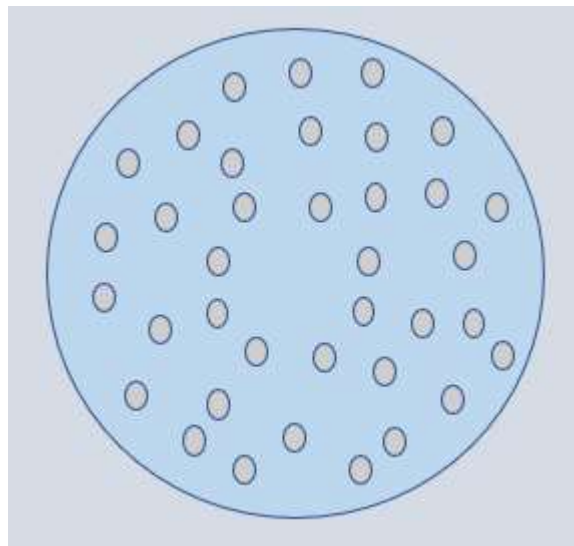


Figura 2.3 Sección transversal fibra de cristal fotónico

**Tabla 2.4 Características de fibra óptica de cristal fotónico Hollow Core Photonic Crystal Fibers by Thorlabs [4]**

Especificación	Valores nominales de la fibra
Diámetro de núcleo	10 $\mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	120 $\mu\text{m}$
Apertura numérica	0.2
Dispersión	90 ps/ nm*Km
Atenuación	0.03 dB/Km @1550 nm

*2.2.1.5 Fibras ópticas multinúcleo*

Son novedosas fibras ópticas que tienen diversos núcleos del mismo diámetro dentro de estas, tiene como sistema de multiplexado por división espacial, el cual consiste en dividir los espacios para que cada fibra óptica tenga su propia región de fibra para transmitir, con esto incrementando su tasa de transmisión. [5]

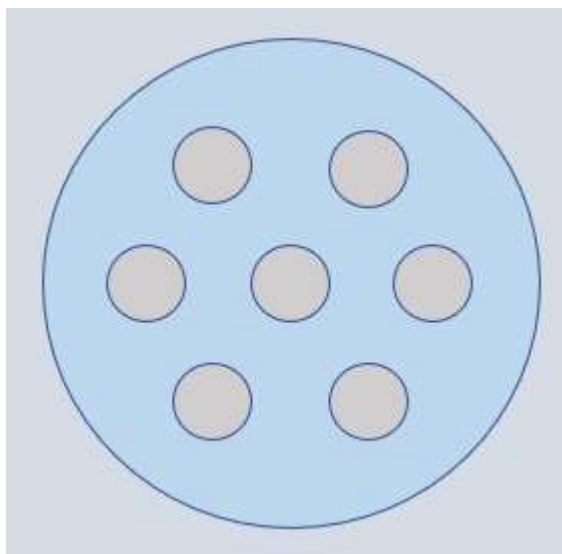


Figura 2.4 Sección transversal fibra óptica multinúcleo

El diseño de estas fibras va directamente orientado al uso de redes ultra rápidas reconfigurables por su potencial uso en la expansión de enlaces y redes.

**Tabla 2.5 Características de fibra óptica multinúcleo [6]**

Especificación	Valores nominales de la fibra
Diámetro de núcleo	8.2 $\mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	125 $\mu\text{m}$
Apertura numérica	0.14
Dispersión	17 ps/ nm*Km
Atenuación	0.17 dB/Km @1550 nm
# de núcleos	7

#### 2.2.1.6 Fibras de plástico

Las fibras ópticas de plástico han tomado relevancia en el estudio de sensores debido a las propiedades de los materiales constitutivos de esta fibra, a pesar de tener pérdidas considerables se han implementado en diversos campos de investigación como una alternativa viable a la fibra óptica de sílice, esto debido a su resistencia y elasticidad propia del plástico, así como de algunas características intrínsecas. [7]

**Tabla 2.6 Características de fibra óptica de plástico**

Especificación	Valores nominales de la fibra
Diámetro de núcleo	150 $\mu\text{m}$ – 2 mm
Diámetro de revestimiento	200 $\mu\text{m}$ -5mm
Atenuación	3 dB/Km @ 650 nm

### 2.2.2 Aisladores y Circuladores

Son dispositivos pasivos que tienen como objetivo dar el paso de la señal óptica en un solo sentido con salida inmediata o subsecuente dependiendo del arreglo que se tenga en el dispositivo, regularmente se encuentran en el mercado con diversas entradas/salidas en caso de los circuladores, y su uso está destinado a partes de los enlaces destinadas únicamente al manejo de señales óptica, ya sea como parte de un multiplexor o de un OADM. [8]

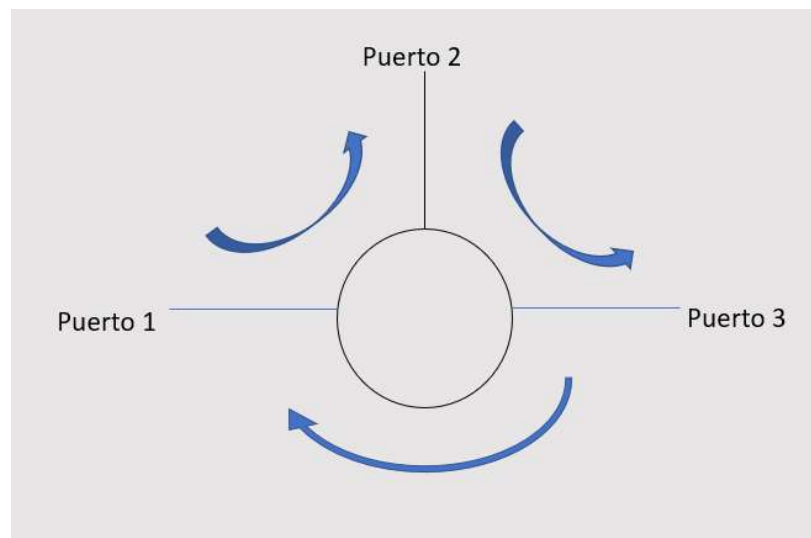


Figura 2.5 Esquema de circulador óptico

El caso de los aisladores es peculiar, pues estos evitan que la onda de luz reflejada por diversos motivos en la fibra llegue al transmisor, con esto evita dañarlo pues debido a su sensibilidad puede llegar a ser un problema, estos elementos están conformados por óptica de bloques, ya sea por rejillas polarizadoras o prismas polarizadores.

### 2.2.3 Acopladores/divisores de haz

Es un dispositivo pasivo que tiene como objetivo juntar dos o más señales de luz en la fibra óptica para así combinarla y transmitirla sobre un hilo de fibra, también, es posible utilizarlo de forma inversas como divisor de haz, al tener la entrada de luz sobre un hilo de fibra y dividirla en razones

50:50 o algunos otros según sean las especificaciones que se tengan, pueden encontrarse en diversas relaciones de potencia entre puertos y con más de dos salidas. Su uso viene como componente de otros dispositivos, ya sean multiplexores o sensores basados en fibra óptica. [8]

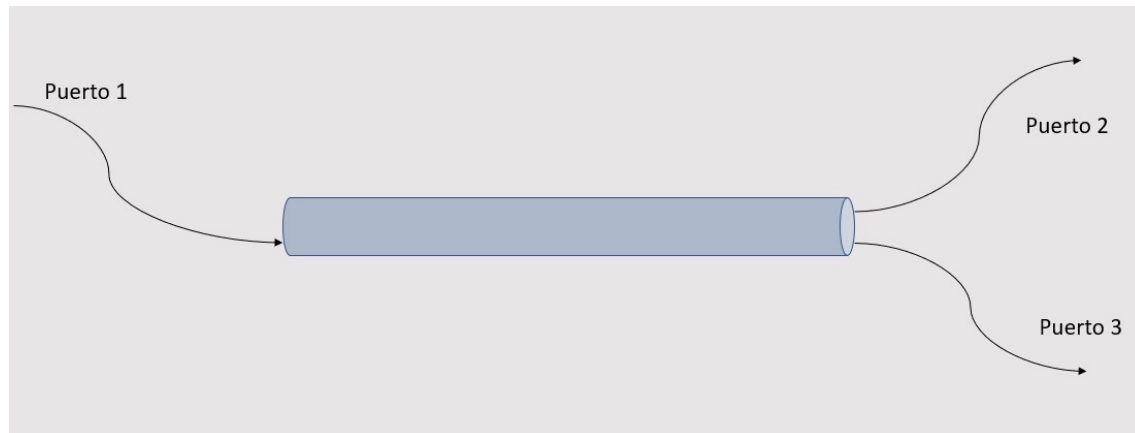


Figura 2.6 Esquemático de un divisor/ combinador de 1x2

En el mercado se encuentran desde 3 usd, hasta arreglos de acopladores de más de 600 usd, cada uno teniendo sus características, que van desde el proceso de fabricación hasta el número de puertos que contiene cada dispositivo.

### 2.2.4 Filtros

Existe una gran variedad de filtros ópticos recurrentes en los sistemas de comunicación basados en fibra óptica, dentro de los más importantes y sencillos son los remarcados como filtros por medio de películas polarizadas delgadas, aunque a su vez pueden ser rejillas de Bragg, así como resonadores Fabry-Perot, entre otros dispositivos, cualquier variante de filtro tiene como objetivo el no dejar pasar una longitud de onda según sea su configuración.

A continuación, se presentan algunas de las variantes de estos filtros en el mercado.

- Filtro Fabry-Perot (películas delgadas): Consiste en una cavidad resonante que tiene pares de películas que se encuentra a tal distancia para que al pasar una señal óptica solo deje

pasar ciertas longitudes de onda, con lo cual se efectúa el filtrado de la señal óptica. Cabe decir que entre más pares de películas delgadas tenga el ancho de banda será menor, por lo que para efectos de filtrado es mejor.

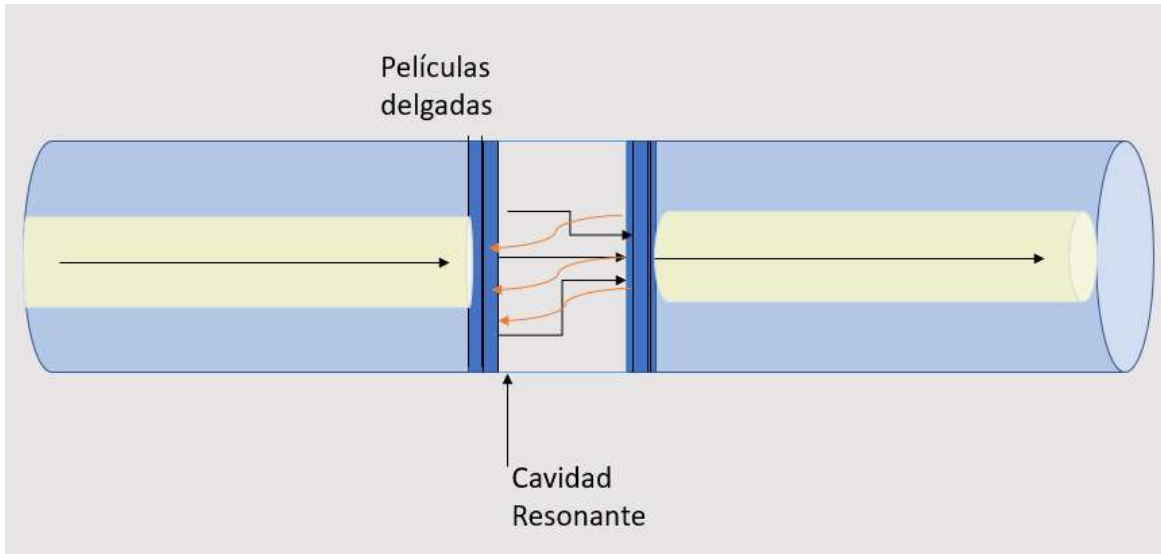


Figura 2.7 Esquemático de filtro Fabry-Perot

- Rejilla de Bragg: Las rejillas de Bragg, además de ser un sensor destacado en la industria, tiene un uso primordial como filtro, pues debido a su fabricación y a la alteración que tiene en su índice de refracción están diseñadas para contener (absorber) una longitud de onda determinada, dado paso al filtrado de señales, este tipo de filtro es utilizado en los sistemas WDM mediante su uso en los módulos OADM.

#### 2.2.5 Elementos activos de líneas y redes de fibra óptica

Son todos aquellos dispositivos cuyas funciones son de amplificación, generación y detección de señales ópticas, requieren de energía eléctrica para su funcionamiento.

#### 2.2.6 Fuentes

Es la una parte fundamental pues de esta se genera la luz que viajará en la fibra óptica, de entrada, se tiene dos tipos de fuentes de luz: LED o LASER las cuales tienen características diferentes entre y por ende una gran diferencia en costos, en la tabla se exponen algunas de las características.

**Tabla 2.7 Características de entre fuentes de luz**

Característica	Fuente LED*	Fuente LASER*
Costo [USD]	1.5	3000
Ancho espectral [nm]	50	1
Potencia [mW]	**	1.2-2
Modulación	Directa o por generador de funciones	Senoidal /fuente externa
Material	Dependiendo de color del LED	**

\* S3FC1310 - DFB Benchtop Laser Source, 1310 nm, 1.5 mW, FC/PC [9] (Láser comparado); SiLED 3 mm (LED comparado)

\*\* sin datos

Como parte de los transmisores también se encuentran otros componentes como los son los moduladores y preamplificadores que se tocan en secciones subsecuentes.

Además, cabe decir que con las nuevas tecnologías de multiplexación como división de longitud de onda (WDM) y multiplexaje por división espacial (SDM) tienen otras variantes de transmisores conforme al sistema de multiplexaje que utilicen, por ende, los costos de estos tienden a ser mayores a las convencionales.



### 2.2.7 Detectores

Convierten la señal óptica en energía eléctrica, pueden ser de diversos materiales y generalmente son polarizados en inversa, en especial los fotodetectores no diferencian entre longitudes de onda, pero si tienen curvas de respuesta a lo largo de las longitudes de onda [10].

Existen dos principales tipos de detección.

- **Coherente:** Al llegar la señal al receptor, pasa primero por un oscilador, si es que la diferencia entre la señal recibida y la del oscilador pasa a una frecuencia intermedia entre ambas y pasa al fotodetector, dentro de sus ventajas es la alta sensibilidad y selectividad que otorga este tipo de detección.
- **Directa:** Tiene una menor sensibilidad en comparación con la detección coherente, por lo cual la relación señal a ruido debe ser mayor para su óptimo funcionamiento, este tipo de detección es definido por obtener directamente los bits transmitidos y transformarlos a bits en forma de energía eléctrica, sin pasar por ningún mezclador u oscilador asociado, ignorando frecuencia y fase de la señal recibida.

Entre estos hay una diferencia sustancial de precios, mientras que la detección directa es de lo más sencilla, la coherente implica el uso de tecnología más avanzada por lo cual el costo de estos dispositivos es más alto.

### 2.2.8 Amplificadores

El objetivo de estos dispositivos es aumentar la potencia de la señal óptica que viaja atenuada a través de la fibra óptica, esta atenuación es debida a la misma fibra, así como a empalmes o debido a birrefringencia inducida por cambios en el índice de refracción de esta causada por tensiones o dobleces a lo largo del tendido, así como por situaciones del ambiente (clima) en que se encuentra.

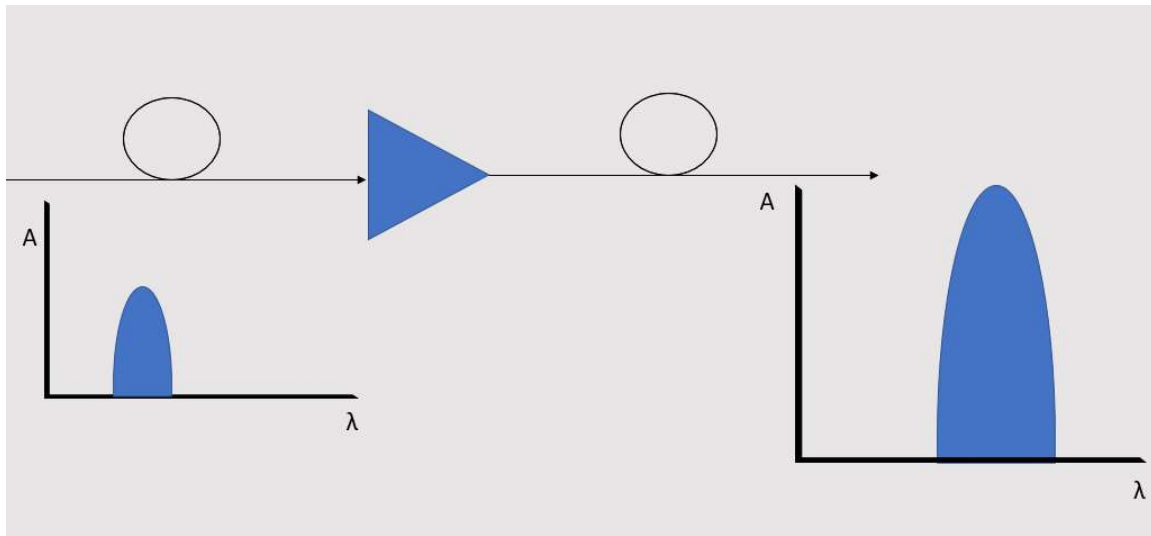


Figura 2.8 Funcionalidad de amplificadores ópticos

Existen 3 amplificadores comerciales más utilizados en la industria, siendo uno de estado sólido amplificador óptico de semiconductor (SOA por sus siglas en inglés), y dos basados en fibra óptica utilizando bombeo de luz para su amplificación Amplificadores de fibra óptica dopados de Erblio (EDFA por sus siglas en inglés) y amplificadores Raman, cabe decir que la amplificación se da en un rango de longitud de onda dado.

### 2.2.9 Moduladores

Es una parte esencial en la implementación de las redes en general, pues nos evita de mandar la señal en banda base, con lo cual codificamos la señal ya sea por medio de amplitud o por medio de fase, con lo cual la transmisión es robusta y más segura.

Hablando de tipos de modulaciones, se tienen dos: analógica y digital, cada una con ventajas y desventajas, dentro de las modulaciones inicialmente utilizadas en las comunicaciones ópticas fueron la OOK (On-Off Keying) y ASK (Amplitud Shift Keying).

La modulación digital resulta ser costosa en comparación con la analógica, debido a la sofisticación de los moduladores, teniendo precios de miles de dólares [11].

### 2.3 Elementos de una red de sensores de fibra óptica

Debido al gran auge de la fibra óptica y su gran incursión en diversas disciplinas de estudios, se lograron hacer dispositivos que miden diferentes características de la señal luminiscente que viaja en la fibra óptica, con lo cual estos dispositivos se han dividido en tres grandes categorías según su método de obtención de información (sensado).

#### 2.3.1 Sensores de fase (interferometría)

Son sensores que funcionan debido a la interferencia de la señal con una onda de referencia, teniendo como referencia una señal sin cambio y otra señal alterada por cambios en la fibra óptica realizados por cambios en la temperatura o esfuerzos en la fibra, lo cual cambia el índice de refracción de esta, así mismo cambiando la fase de la señal.

Dentro de los sensores de fase se encuentran los interferómetros Mach-Zender e interferómetros Michelson, así mismo, existen algunos otros como los interferómetros de Sagnac.

El proceso de interferencia consiste en tener una señal de referencia y una señal de detección para medir alteraciones en la fibra que provocan cambios de fase en la señal que es transmitida, ambas señales viajan por caminos ópticos de longitud semejante, se hacen interferir, dando una señal resultante, la cual puede ser:

Constructiva: Ambas señales llegaron sin cambios en sus fases, por lo cual al interferir hacen que la señal resultante tenga una intensidad equivalente a la suma de ambas señales (referencia y detección).

Destructiva: Al hacer interferir la señal de referencia y de percepción se tiene una diferencia de fase, la cual puede ser un desfase pequeño, provocando una señal resultante con intensidad equivalente a la resta de la intensidad de referencia menos la intensidad de percepción, por otra parte, puede darse el caso de estar en contrafase, donde si la intensidad de referencia y de percepción son iguales provocaría una señal resultante nula.

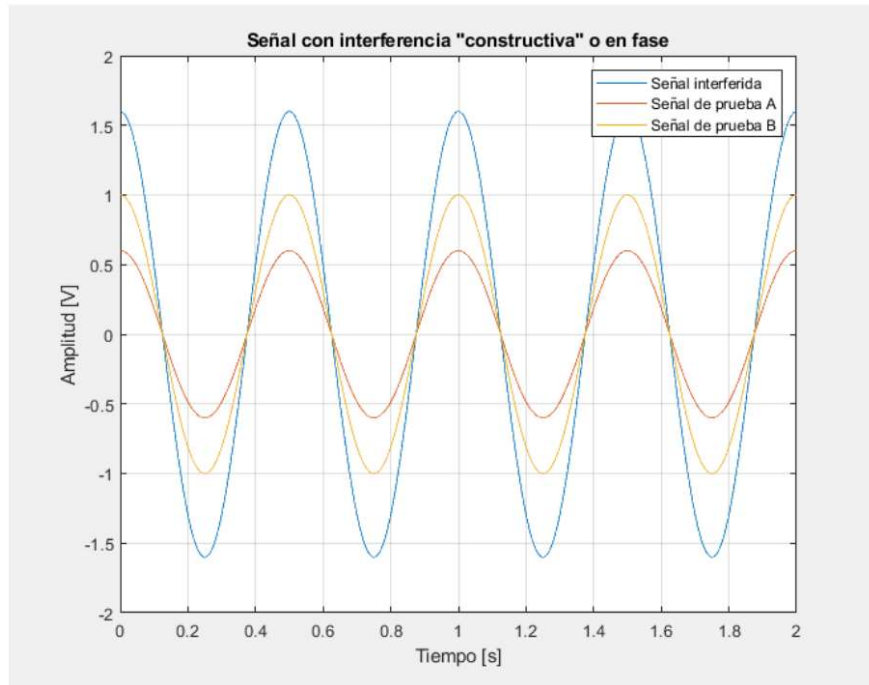


Figura 2.9 Interferencia constructiva o en fase

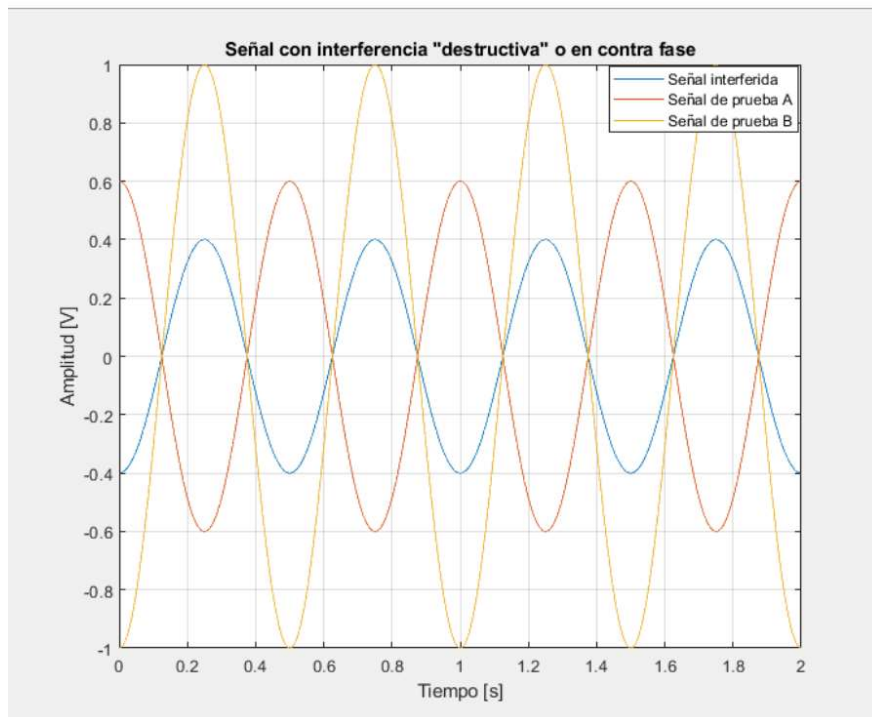


Figura 2.10 Interferencia destructiva

### 2.3.2 Sensores de intensidad

Es el tipo de sensor más sencillo, se basa en las pérdidas de la señal como principio de medida según las condiciones ambientales en que se encuentre el sensor, pueden ser cambios de temperatura, dobleces, u otro factor físico, esto produce cambios en la intensidad.

Estos sensores se pueden dividir en intrínsecos y extrínsecos.

- Intrínsecos: se mide el cambio dentro de la fibra óptica utilizada.
- Extrínsecos: Utilizan a la fibra óptica como canal de transmisión, los cambios se miden mediante otro dispositivo.

Los fenómenos físicos que se utilizan en los sensores de la intensidad son: la absorción de luz, reflectancia, esparcimiento (Raman o Rayleigh), entre otros.

### 2.3.3 Sensores basados en Rejillas de Bragg

Dentro de los sensores ópticos, las rejillas de Bragg han mostrado su gran utilidad como sensores capaces de detectar eficientemente diversas magnitudes físicas, [12] se utilizan rejillas de Bragg para monitorear la salud estructural de un puentes, edificios y conductos de agua, gas, entre otros. Como este ejemplo se han desarrollado miles más alrededor del mundo.

Las rejillas de Bragg basan su funcionamiento en la reflexión de una longitud de onda, que ocurre cuando la luz pasa de un medio con un índice de refracción a otro medio con un índice de refracción diferente, lo que da lugar a que la luz se refleje.

Este cambio en el índice de refracción se da gracias al proceso de fabricación de las rejillas, las cuales al pasar luz ultravioleta sobre una fibra óptica aplicándolo a lo largo de una longitud de la fibra cambia periódicamente el índice de refracción.

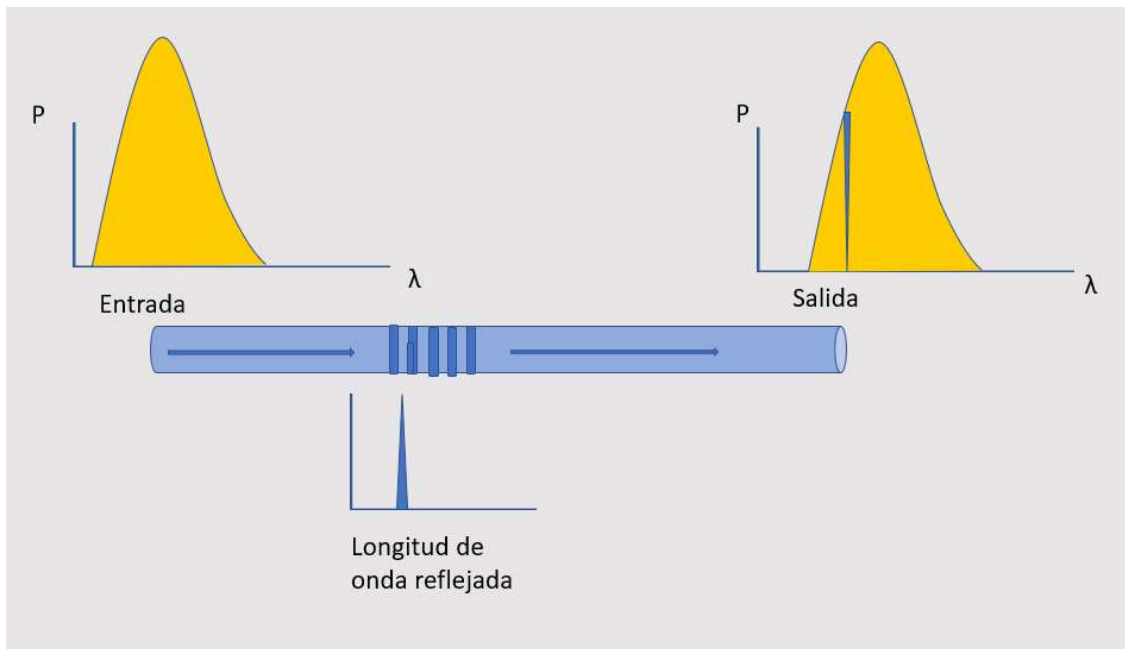


Figura 2.11 Estructura de rejilla de Bragg con respuesta espectral

La longitud de onda reflejada es llamada longitud de onda de Bragg  $\lambda_B$ , está en función del índice de refracción promedio  $\eta$  y la periodicidad de la rejilla  $\Lambda$ , y está definida como:

$$\lambda_B = 2\eta\Lambda$$

Para su utilización como sensor tienden a tener diversas rejillas repartidas a lo largo de las estructuras, o en su defecto pueden estar solo en lugares clave para su estudio y monitoreo.

#### 2.3.4 Análisis de los sistemas existentes de monitoreo con base en sensores ópticos

Existen diversos sistemas que se han empleado en el monitoreo de salud estructural, siendo lo más conocidos los aplicados a puentes y edificios inteligentes [8]. Además, se comercializan soluciones conjuntas de dispositivos que prevén de situaciones causadas por fenómenos naturales, a continuación, se analizan estos sistemas y soluciones.

Existen compañías como AOS [13] que se especializan en comercializar sistemas de rejillas de Bragg para monitoreo de estructuras, pero a su vez, comercializan sistemas integrales para monitoreo de obra civil, las cuales son capaces de monitorear esfuerzos por tensión, temperatura

y vibraciones en rejillas de Bragg individuales o en cascada, los cuales son escalables en cuanto al número de canales que puede monitorear, así mismo, existen diversos arreglos de rejillas de Bragg emplazadas en diversos puentes, y edificios que tienen lugar en redes de sensores de edificios inteligentes, estos pueden percibir deformaciones y cambios de temperatura que son correlacionados con salud de las superficies en cuestión.

A su vez, compañías especializadas en diseño de dispositivos para telecomunicaciones como Sumitomo [14] tienen soluciones basadas en reflectometría óptica en dominio temporal (OTDR) para su uso en el monitoreo de enlaces que pueden ser aplicables en el monitoreo de estructuras, pues al ser un sensor de intensidad tiende a medir las pérdidas por retro esparcimiento que pueden ser provocado por los cambios en el índice de refracción causados por tensiones en los cables de fibra óptica, cabe decir que esta solución únicamente contempla el dispositivo, el cual puede ser instalada en el núcleo de las redes teniendo diversas opciones de monitoreo.

En la investigación, Carlidge [15] ha desarrollado sistemas con fibra como sensor de intensidad, con uso inmediato en detección de sismos por medio sensores acústicos de interrogación (DAS por sus siglas en inglés), los cuales funcionan enviando luz pulsada por medio de un láser a través de un cable de fibra óptica enterrado en el subsuelo, el cual es estirado y comprimido dependiendo de los movimientos sísmicos, lo que provoca en la fibra que la luz pulsada tenga retro esparcimiento y por ende cambios de fase en la luz retro esparcida, lo cual detecta un dispositivo de interrogación mandando alertas sobre posibles eventos.

Recientemente se ha dado el salto en el uso de rejillas de periodo largo (LPFG por sus siglas en inglés) las cuales tienen longitudes mayores a las rejillas de Bragg y son catalogadas como sensores distribuidos, según Eftimov [16] son capaces de medir mayor número de magnitudes en donde se utilicen, prueba de esto son las ocupadas en puentes y carreteras son capaces de medir incluso torsión de la superficie a la cual está adherida la rejilla, aunque sigue en desarrollo su encapsulamiento y venta en la industria.

Por otra parte, se han utilizado sensores de tipo Mach-Zhender [17], los cuales son fibras de diversos tipos empalmadas, las cuales funcionan mediante el principio de superposición y de

interferencia de modos, con las cuales son capaces de medir cambios de temperatura y tensión en puentes y obra civil.

**Tabla 2.8 Tabla de dispositivos de monitoreo estructural basados en fibra óptica**

Dispositivo	Variable Medida	Funcionamiento
Reflectómetro óptico	Tensión, temperatura, fase	Retro esparcimiento
FBG	Tensión y temperatura	Cambios en longitud de onda de Bragg
LPFG	Torsión, Tensión Temperatura,	Cambios en longitud de onda filtrada
Sistema dinámico- acústico	Tensión	Retro esparcimiento
Mach-Zhender	Tensión y temperatura	Cambios en interferencia modal

En la siguiente sección se aborda un sistema desarrollado en la UNAM como alternativa a los sistemas de monitoreo antes mencionados, siendo esta una alternativa de bajo costo.

#### 2.4 Trabajo previo realizado en la UNAM

En la Facultad de Ingeniería de la UNAM se han realizado investigaciones desarrollando una técnica alternativa de detección de fallas estructurales en forma de grietas en edificaciones, mucho más sencilla y económica en comparación con las técnicas de sensores basados en Rejillas de Bragg (FBG), rejillas de periodo largo (LPFG) y retro esparcimiento Briuloin (BOTDA).

Dicha técnica implementa el “método de testigo”, que consiste en el uso de rotura de las fibras ópticas ancladas sobre un elemento estructural como testigo de agrietamiento de este elemento [18-20]. Un cambio brusco de la intensidad señal óptica “piloto” transportada por la fibra óptica es una evidencia (un testigo) de apariencia de una grieta en el elemento estructural. De trabajos



anteriores realizados en la UNAM se obtuvo nuevo conocimiento significativo sobre la eficacia de la técnica, pero con esto se han surgido nuevas interrogantes y variantes para seguir el desarrollo de la investigación.

### 2.5 Integración de las redes de sensores con distintas redes de comunicaciones

La llegada de nuevas tecnologías a la vida cotidiana ha cambiado la manera de tener interconectividad entre las personas y los objetos que utilizamos a diario, por lo cual el internet de las cosas (IOT) ha llegado a ser parte crucial para el desarrollo de las tecnologías emergentes y de las ya establecidas.

El concepto de IOT consiste en tener interconectividad de todo tipo de dispositivos, desde un reloj hasta casas completas conectadas dentro de una misma subred, ya sea personal o familiar, dando paso a la automatización de actividades cotidianas. Este concepto se venía desarrollando desde principios de los años 2000, pero fue hasta recién que se ha llegado a instalar, debido al desarrollo de protocolos y normas creadas para esta interacción.

Considerando que en cada uno de estos dispositivos tienen en su interior un sistema de sensado particular, se tiene un concepto de que IOT es una red gigantesca de sensores conectados entre sí, que pueden ayudar a la resolución de diversas adversidades a las que la sociedad se enfrenta día tras día.

En estos días es posible tener conectada desde un refrigerador hasta el mismo auto con el hogar, haciendo todo más simple en los ojos del usuario promedio, el reto viene para los desarrolladores de redes que han visto la necesidad de incluso ocupar un nuevo protocolo de internet (IPv6) [21] para contener las direcciones de internet que cada uno de los dispositivos ocupa, y dada esta cantidad de información el uso de las comunicaciones ópticas como espina dorsal se está aumentando, tanto es así que se está trabajando en crear nuevas fibras ópticas y nuevos sistemas de multiplexado para manejar tales cantidades de información. Con la llegada de las redes 5G se prevé que despunte aún más el uso de sensores de todo tipo y estén conectados entre sí haciendo un híbrido de ciudad inteligente.

Investigaciones recientes indican que debido a la cantidad de dispositivos que se contempla en un futuro tendrá repercusión directa en el avance de las comunicaciones ópticas, además, los recursos comprendidos con la manufactura y distribución tendrán impacto en el medio ambiente, con lo cual se trabaja en diseñar sistemas de comunicaciones eficientes y eficaces capaces de transportar el volumen de información que se prevé y reducir el consumo de energía para tal cantidad.

Se han diseñado sistemas basados en tecnología de multiplexación de longitud de onda (WDM) capaces de reducir la energía empleada y la latencia utilizando sistemas ópticos de distribución, lo cuales tiene arquitectura de anillo y utilizando frecuencias de transmisión de cientos de THz [22].

El uso de las tecnologías en las redes IOT [23] son Zigbee, RFID, WIFI, 4G y 5G, tienen protocolos de homologación entre estas e incorporan sensores para su uso en ciudades, esto debido a las amplias áreas que pueden alcanzar en su traza geográfica.

## 2.6 Conclusiones del capítulo

1. Existen diversos dispositivos que son utilizados en la industria de telecomunicaciones para su uso en redes ópticas y que a su vez son potenciales variantes para su uso en sistemas de monitoreo de estructuras.
2. El uso de los dispositivos mencionados en este capítulo depende plenamente del tipo de enlace con el que se está trabajando, dado que tanto la fibra óptica y la longitud de onda están diseñadas bajo parámetros exclusivos.
3. Existen diversos sistemas de monitoreo basados en tecnología de fibra óptica, de los más utilizados son Rejillas de Bragg como elementos de sensado, capaces de medir 2 magnitudes principales, tensión y temperatura.
4. Las rejillas de periodo largo se han incorporado a las redes de monitoreo como elementos capaces de medir hasta 6 magnitudes físicas, sin embargo, sigue en desarrollo su tipo de comercialización y encapsulado.
5. Las soluciones que se comercializan para monitoreo de salud estructural pese a que en los últimos años ha sido más comunes siguen siendo costosas.
6. EL uso de fibra como testigo de daño estructural promete bajar costos y ser una alternativa viable a los sistemas de monitoreo de salud estructural ya existentes.

## 2.7 Referencias

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*, Rochester, NY: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] Thorlabs, «Datasheet 0.27 NA Graded Index 62.5µm Multimode Fiber,» Thorlabs, [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/Images/PDF/Vol18\\_897.pdf](https://www.thorlabs.com/Images/PDF/Vol18_897.pdf). [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [3] C. Inc., «Data Sheet Optical Fiber SMF 28 e+,» [En línea]. Available: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1463-AEN.pdf>. [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [4] Thorlabs, «Hollow Core Photonic Crystal Fibers,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=912](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=912). [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [5] O. a. F. Company, «Multicore Optical Fiber,» Furukawa, [En línea]. Available: [https://www.ofsoptics.com/multicore-optical-fiber/#:~:text=OFS%20Multicore%20Fiber%20\(MCF\)%20is,to%208%20have%20been%20produce d..](https://www.ofsoptics.com/multicore-optical-fiber/#:~:text=OFS%20Multicore%20Fiber%20(MCF)%20is,to%208%20have%20been%20produce d..) [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [6] Sumitomo Electric, «Multi-Core Fiber,Ultra High Density Data Transmission,» [En línea]. Available: <https://sumitomoelectric.com/rd/optical-communications-laboratory/multi-core-fiber>. [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [7] R. Paschotta, «Plastic Optical Fibers,» RP Photonics, [En línea]. Available: [https://www.rp-photonics.com/plastic\\_optical\\_fibers.html](https://www.rp-photonics.com/plastic_optical_fibers.html). [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [8] J. Lopez-Higuera, «Handbook of Optical Fibre Sensing Technology,» John Wiley & Sons, 2002, p. 104.
- [9] Thorlabs, «S3FC1310 - DFB Benchtop Laser Source, 1310 nm, 1.5 mW, FC/PC,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S3FC1310>. [Último acceso: 15 Enero 2022].
- [10] Springer, *Handbook of Lasers and Optics*, Segunda ed., Berlín: Springer, 2012.
- [11] Thorlabs, «Benchtop High-Speed LiNbO3 Electro-Optic Modulator Drivers,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=9949#ad-image-0](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9949#ad-image-0). [Último acceso: 16 Enero 2022].
- [12] C. K.-Y.-Leung, K. Tai-Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H. Chung-Wu y M. Imai, «Review: optical fiber sensors for civil engineering,» *Materials and Structures*, vol. 2015, nº 48, pp. 871-906, 2013.

- [13] Advanced Optics Solutions GmbH, «FBG Monitoring Systems,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.aos-fiber.com/eng/Sensors/AWEen.html>.
- [14] Sumitomo Electric, «Remote monitoring of FTTx distribution line,» 2020. [En línea]. Available: [https://sumitomoelectric.com/Remote\\_Monitoring\\_FTTx](https://sumitomoelectric.com/Remote_Monitoring_FTTx).
- [15] E. Cartlidge, «DAS: A Seismic Shift in Sensing,» *Optica*, pp. 29-34, 2021.
- [16] T. Eftimov, «SENSOR APPLICATIONS OF FIBER BRAGG AND LONG PERIOD GRATINGS,» de *Optical Waveguide Sensing and Imaging*, Springer, 2008, pp. 1-23.
- [17] H. Youwang, S. Xiayoan, D. Xinran y D. Ji'an, «Simultaneous Curvature and Temperature Sensing Based on a Novel Mach-Zehnder Interferometer,» *Photonic Sensors*, vol. 10, nº 2, pp. 171-180, 2020.
- [18] D. Hernandez-Reyes, Las fibras ópticas como testigo de daño estructural con aplicaciones potenciales en el monitoreo del antiguo templo de San Agustín, Ciudad de México: Tesis de Licenciatura, UNAM, 2020.
- [19] A. Hurtado de Mendoza-Lopez, Las fibras ópticas como testigos de agrietamiento en la mampostería de tabique, Ciudad de México: Tesis de Maestría, UNAM, 2019.
- [20] J. A. Juarez-Mancera, SISTEMA DE MONITOREO DE UNA RED ÓPTICA DE SENSORES, Ciudad de México: Tesis de Maestría, 2020.
- [21] A. Rehman-Javed, F. Shahzad, S.-u. Rehman, Y. Bin-Zikria, I. Razzak, Z. Jalil y G. Xu, «Future smart cities requirements, emerging technologies, applications, challenges, and future aspects,» *Cities: International Journal of Urban Policy and Planning*, nº 103794, 2022.
- [22] A.-K. Garga, V. Janyanib y B. Batagelj, «Ring based latency-aware and energy-efficient Hybrid WDM TDM-PON with ODN interconnection capability for smart cities,» *Optical Fiber Technology*, vol. 58, 2020.
- [23] L. Zonglei, Y. Lianshan, J. Hengyun, C. Zhiyu y G. Yinghui, «Simultaneous Transmission of RFID, WIFI and ZigBee over Fiber,» *2013 22nd Wireless and Optical Communication Conference*, pp. 577-579, 2019.

## Capítulo 3. Propuesta conceptual de sistema de monitoreo daño estructural en líneas del metro

### 3.1 Propuesta conceptual de monitoreo de daños estructurales a las líneas de metro de la Cd. de México

#### 3.1.1 La sismicidad en la Ciudad de México y post evaluación de edificios en caso de sismos

Los movimientos telúricos en la Ciudad de México han costado infraestructura y pérdida de vidas, esto debido a la ubicación geográfica de la misma y su cercanía puntos de alta sismicidad en los océanos, principalmente en la costa suroeste del país [1].

Derivado de esto se han desarrollado protocolos a seguir por autoridades de protección civil, estos manuales de contingencia ante sismos han sido desarrollados en todo el mundo principalmente después de evaluar daños en la infraestructura de las ciudades, contemplando eventualidades y situaciones que ponen en riesgo la integridad física de las personas que puedan estar en edificaciones afectadas por los sismos y que indican si la edificación en cuestión es segura o tuvo algún tipo de daño.

En México existen manuales de evaluación de edificaciones post sismos, uno de ellos desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM [2], en este nos muestra las pautas a seguir en caso de daños en edificaciones de mampostería, dónde según el tipo de grieta, ancho y ubicación puede ser factible un daño estructural leve o grave.

En el ámbito internacional los manuales desarrollados tienen como base la norma ATC-21-T [3], donde tienen procedimientos para determinar la salud estructural, que son adaptados en los países dependiendo de su ubicación y del tipo de material principal utilizado en las edificaciones.

Las publicaciones consultadas [2-4] concuerdan en la tabla 3.2 donde se da una explicación nivel de daño en edificaciones de concreto/mampostería.

**Tabla 3.1 Criterios para determinar el grado de daño de elementos estructurales de concreto [2, 4].**

<i>Grado</i>	<i>Estado de daño de los elementos estructurales</i>
I	Grietas pequeñas pero visibles sobre la superficie de concreto (Grietas con ancho menor a 0.2 mm)
II	Grietas claramente visibles sobre la superficie de concreto. (Grietas con ancho de 0.2 mm a 1 mm)
III	Agrietamiento local de recubrimiento de concreto. Grietas Grandes (entre 1 y 2 mm)
IV	Agrietamiento apreciable del concreto. Pérdida del recubrimiento y presencia de barras expuestas.
V	Barras de refuerzo pandeadas Núcleo del concreto agrietado Aplastamiento de la columna/muro Asentamiento o inclinación en el sistema de piso.

### 3.1.2 Propuesta de sistema de monitoreo

Se propone el uso de fibra óptica como testigo de daño estructural en las instalaciones del sistema colectivo metro. La motivación es que en los últimos años se han registrado sismos en la Ciudad de México que han mermado el funcionamiento de diversas líneas del sistema colectivo causando daños estructurales. Recientemente en 2020, la pérdida de vidas debido al colapso de vías elevadas de la línea 12 del metro. Sin un sistema de alertas que se tenga presente en el sistema colectivo estos hechos pueden suceder nuevamente.

Las carencias principales que aquejan al sistema colectivo metro es la poca infraestructura en materia de monitoreo, por lo cual no es posible prevenir el mal funcionamiento de las vías y de las estructuras tanto de estación, como de trayecto que tiene cada línea de metro. Sabiendo esto, podemos proponer el uso de fibra óptica como dispositivo de monitoreo estructural.

El método de fibra óptica como testigo es un sistema viable aplicable al sistema colectivo metro debido a su bajo costo de implementación y que este no tiene repercusiones electromagnéticas que puedan afectarlo, mediante el uso de fibra óptica en lugares de importancia estructural en las estaciones se pueden prevenir tragedias y actuar en cuanto se tengan alertas en el sistema.





### Capítulo 3: Propuesta conceptual de sistema de monitoreo de daño estructural en líneas del metro

La figura 3.1 contempla un diagrama de bloques general para la red en cada línea de metro, esta puede tener variante según los componentes utilizados y el tipo de fibra empleada.

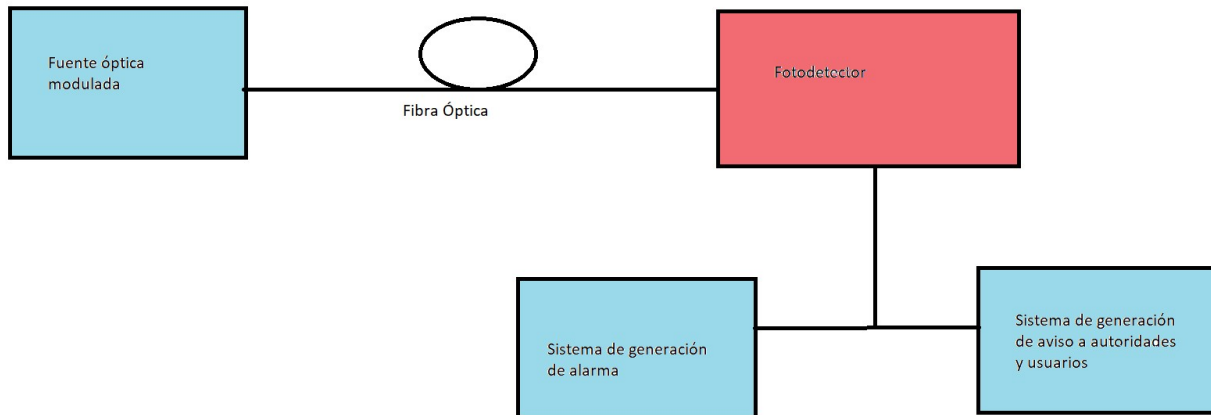


Figura 3.2 Diagrama de bloques para red de monitoreo generalizado

Conforme a esto se realizó un estudio cualitativo de la señal óptica en el sistema basándose en dos tipos de fibra óptica, mono modal y multi modal. Así mismo, se realizó una tabla con los posibles elementos de red para cada enlace.

Se realizaron tablas con el valor de pérdidas de potencia de cada una de las posibles implementaciones en los casos que se abordarán, estas son específicamente el caso de un enlace multimodal y un enlace mono modal, además, se incluye en otro apartado el valor monetario de cada componente.

**Tabla 3.2 Tabla de componentes para la red**

Componente	Precio [USD]	Características
Fibra óptica 200/220	\$ 4.6/metro	Canal MML
Fibra óptica 62.5/125	\$0.13/metro	Canal MML
Fibra óptica SMF 28	\$0.1/metro	Canal SML
LED	\$ 1	Fuente MML
Circuito Tx*	\$5	Transmisor MML

Amplificador	\$1600	MML
Fotodiodo receptor	\$1.5	Receptor MML
Osciloscopio	\$200	Monitoreo
Láser	\$2050	Fuente SML
Fotodetector	\$64	Receptor SML
Aislador	\$99	SML

Conociendo estos elementos también se compilaron en tablas la función y las pérdidas que tendría cada elemento de pérdida en la red.

**Tabla 3.3 Características de componentes y pérdidas en el enlace multi modal**

Elemento	Función	Pérdidas [dB]
Fibra 0.22 NA 200/220	Canal	6 dB/Km @ 700 nm 1.5 dB/km @ 1310 nm
Fibra infinitor OM1 (62.5/125)	Canal	2.9 dB/km @ 800 nm 0.6 dB/km @ 1310 nm
Empalme	Unión	0.1 c/u
Conectores	Unión	0.1 c/u

**Tabla 3.4 Características de componentes y pérdidas en el enlace mono modal**

Elemento	Función	Pérdidas [dB]
SMF 28 e+	Canal	0.35 dB/Km @ 1310 nm
Empalme	Unión	0.1 c/u
Conectores	Unión	0.1 c/u

Estas tablas son de importancia para la obtención de los presupuestos de potencia.

$$\text{Pérdidas de potencia: } PL = \alpha * L + N * P_{emp} + P_{conec} * M + MP \quad (3-1)$$

$$\text{Power Budget} = P_{tx} - PL \quad (3-2)$$

Dónde:

- $\alpha$ : constante de atenuación de la fibra
- $PL$ : Pérdidas de potencia
- $N$ : # de empalmes
- $M$ : # de conectores
- $L$ : Longitud del enlace
- $P_{emp}$ : Pérdidas por enlace
- $P_{conec}$ : Pérdidas por conectores
- $MP$ : Margen de Pérdidas
- $P_{tx}$ : Potencia de Transmisión

Estos componentes están basados en un desarrollo simple de la red donde de primera se tiene un canal, transmisor y receptor, sin mencionar los dispositivos para la obtención de datos de forma digital ya sea por un DAC y sistema de alarma tanto para usuario como para autoridades correspondientes.

Otro aspecto importante de estas estructuras es la longitud que se tienen en las líneas de metro pues de esto depende la atenuación de la señal en el enlace, aunado a esto, hay diversas formas en que puede fallar un enlace, ya sea por la misma fauna dentro del sistema colectivo o debido a acciones humanas. Por lo cual también se analiza la opción de utilizar fibra óptica mono modal como alternativa en el canal de transmisión, siendo esta más accesible, pero subiendo en costos a la fuente y al receptor.

En la red colectiva metro se tiene una diversidad de materiales de construcción, así como de años de operación que han tenido en este servicio, hay que tener en cuenta los esfuerzos que se tienen en las columnas que van en segmentos elevados por la periferia y los esfuerzos que se dan en las cúpulas de los túneles donde es de vital importancia conocer y monitorear el estado de estas.

Dentro de la ciudad de México existe este sistema de transporte colectivo, el cual cuenta con 156 estaciones y más de 100 km de vías, de las cuales 26 estaciones son elevadas con un recorrido de 26 km aproximadamente, y para evitar catástrofes como las que se han presentado en estas

### Capítulo 3: Propuesta conceptual de sistema de monitoreo de daño estructural en líneas del metro

estaciones se propone un sistema de monitoreo. Es difícil que siendo un centro de aglomeración para los ciudadanos se tenga tan poco registro de los problemas que existen a lo largo de la red Metro.

En la tabla 3.5 se tiene en conjunto con la línea y su recorrido y el número de estaciones con las que cuenta, ya sean subterráneas o elevadas.

**Tabla 3.5 Líneas del metro de la CDMX, con longitudes y estaciones [5]**

# de Línea	Distancia de recorrido [Km]	Estaciones	
		Elevadas	No elevadas**
línea 1, Rosa	16.8	0	20
Línea 2, Azul	20.8	0	24
Línea 3, Verde	21.4	0	21
Línea 4, Verde agua	9.5	8	2
Línea 5, Amarilla	12.6	0	13
Línea 6, Roja	11.4	0	11
Línea 7, Naranja	17	0	14
Línea 8, Verde oscuro	17.6	0	19
Línea 9, Café	13	4	8
Línea A, Morada	14.8	0	10
Línea B, Gris/verde	20.2	4	17
Línea 12, Dorada	23.9	9	11

\*los datos presentados en la tabla 3.6 se obtuvieron de [5] [6]

\*\*Estaciones no elevadas incluyen estaciones subterráneas y superficiales

#### 3.2 Análisis cuantitativo de las características principales de la red de monitoreo de algunas líneas del metro de la Cd. de México

En este trabajo se considera que el despliegue de la red de monitoreo será dividido en tramos según las líneas y llegando a un nodo central para su procesamiento de datos, cabe destacar que los puntos de interés dentro del sistema serían aquellos que representaran esfuerzos grandes

Capítulo 3: Propuesta conceptual de sistema de monitoreo de daño estructural en líneas del metro

para las estructuras en que están, siendo así que las estaciones elevadas tomarían gran relevancia en el estudio.

Con los datos de la tabla 3.5 se realizó la tabla 3.6, la cual se basó en el cálculo de los presupuestos de potencia para cada línea, cabe decir que el acomodo de los equipos para cada línea se puede tener al inicio y al final según se designe el acabado de cada línea.

**Tabla 3.6 Presupuestos de potencia óptica por línea del metro**

Línea	Potencia de recepción [dBm]				
	SMF-28	MMF 200/220 @700 nm	MMF 62.5/125 @800 nm	MMF 200/220 @1310 nm	MMF 62.5/125 @1310 nm
línea 4, Verde agua	-8.715	-62.39	-32.94	-19.64	-11.09
Línea 9, Café	-10.01	-83.46	-43.16	-24.96	-13.26
línea B, Gris/verde	-12.674	-126.804	-64.184	-35.904	-17.724
Línea 12, Dorada	-14.043	-149.078	-74.988	-41.528	-20.018

En la tabla 3.7 se presentan los costos monetarios de la red por cada línea de metro, las cuales dependen del tipo de fibra utilizada y la longitud de onda utilizada para el cálculo de los presupuestos de potencia.

**Tabla 3.7 Costo de enlace óptico por línea**

Línea	Costo [USD]				
	SMF-28	MMF 200/220 @700 nm	MMF 62.5/125 @800 nm	MMF 200/220 @1310 nm	MMF 62.5/125 @1310 nm
línea 4, Verde agua	\$3,633.30	\$47,107.50	\$3,043	\$46,113	\$3,648
Línea 9, Café	\$3,975.80	\$63,207.50	\$3,498	\$62,213	\$4,103
línea B, Gris/verde	\$4,688.60	\$96,327.50	\$4,434	\$95,333	\$5,039
Línea 12, Dorada	\$5,058.90	\$113,347.50	\$4,915	\$112,353	\$5,520

### Capítulo 3: Propuesta conceptual de sistema de monitoreo de daño estructural en líneas del metro

El costo de la fibra de 200/220 es demasiado elevado lo cual descarta esta opción, por otra parte, tanto la fibra SMF 28 como la fibra de 62.5/125 dan costos semejantes, e incluso en la variante de 800 nm la fibra infinitor OM1(62.5/125) tiene un valor inferior.

De la figura 3.2 se realizaron modificaciones para fibra mono modal y multimodal, debido a la atenuación calculada en el presupuesto de potencia se recomienda el uso de amplificadores que puedan contrarrestar la baja potencia de llegada al fotodetector.

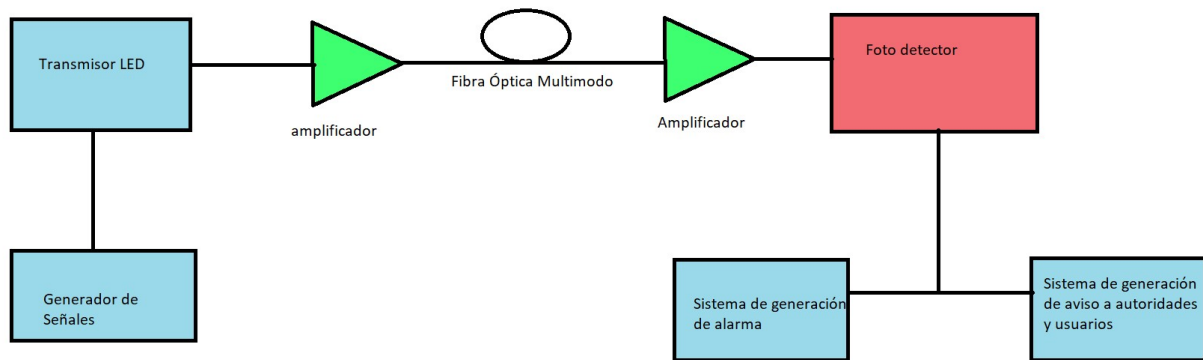


Figura 3.3 Diagrama de bloques para enlace multimodal para fibra multimodal 200/220 @ 700 nm y fibra multimodal 62.5/125 @ 800 nm

En la figura 3.3 se tiene un diagrama de bloque con un tendido de fibra SMF basado en los componentes de la tabla 3.4, en el cual solo se agrega el uso de un aislador a la red para protección de fuente láser.

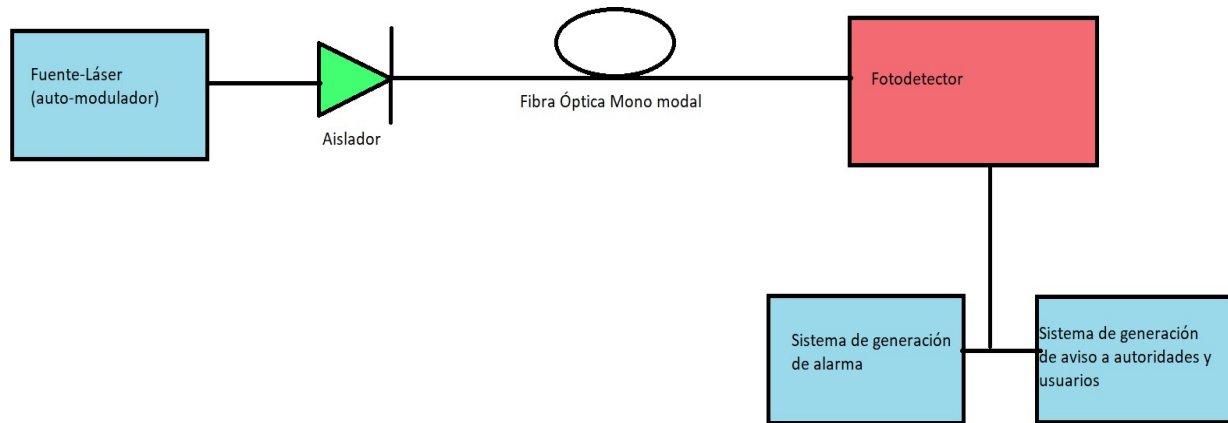


Figura 3.4 Enlace mono modal y multimodal @1310 nm con aislador para protección de fuente láser

El uso de los dispositivos adicionales en cada enlace fue tomado en cuenta en el presupuesto monetario, en caso de los enlaces con fibra multimodo puede que se necesite de un dispositivo que contrarreste la dispersión que pueda sufrir la señal.

Así mismo, el hecho de que diversas líneas tienen interconexiones es de utilidad para la centralización de los dispositivos transceptores en algún punto específico dentro de las instalaciones en que se interconectan, idealmente pudieran ser en terminales como lo es el caso de la CENTRAM Pantitlán que aglomera 5 líneas que parten a diversos puntos dentro de la ciudad de México.

Considerando esto, se prevé el uso de fibra anclada a puntos cable de monitoreo en la infraestructura del sistema, en donde se medirá constantemente la señal recibida por un sistema transmisor, en caso de tener alguna falla el sistema está contemplado para enviar una señal de alarma, esta falla implica que se tienen grietas lo largo del tendido y que por ende se ha roto la fibra, por lo cual es de vital importancia calcular que tanta fuerza de tensión puede soportar la fibra óptica y cuanto es el ancho de estas grietas formadas por las fallas en la edificación.



### 3.2.1 Análisis de la operación pulsada de emisores de luz

La operación de las fuentes ópticas y LED como láseres semiconductores por medio de pulsos ultracortos pueden proveer de una potencia óptica instantánea enorme sin sobrecalentar y dañar el dispositivo transmisor. Actualmente se tienen fuentes ópticas de transmisión de gran potencia y dependiendo de la aplicación tienen diferentes tipos de moduladores para generar pulsos más o menos pequeños, sin embargo, también existen fuentes laser que ocupan tanto pulsos cortos como grandes potencias instantáneas, el caso más utilizado es en medicina, espectroscopia o velocimetría, no obstante, la posible aplicación a sistemas de monitoreo pudiera ser un determinante en el modo de empleo de la fibra óptica como sensor de estructuras.

En [7] hablan sobre nuevos LED y fuentes súper luminiscentes que tienen picos de potencia en el espectro visible de luz, conteniendo diversos canales provechosos con frecuencias de operación de 1 Hz hasta 1 MHz.

Existen también fuentes láser con adecuaciones para entregar pulsos con duración de apenas 50 ps, en [7] se encuentran en conjunto con los LEDs para diversas longitudes de onda del espectro visible, la conectividad de este con las fuentes convencionales es un problema debido a la potencia que manejan y su conector de tipo microondas con lo cual la adaptación a fibra óptica se vería obstruida por esto.

La técnica designada para la generación de estos pulsos ultracortos mediante el uso de láseres de bloqueo de modo pasivo (pasively mode-locked lasers), o en algunas otras mediante el uso de amplificadores ópticos paramétricos [8]. También, se tiene la técnica de utilizar pulsos largos y aplicar métodos de compresión de pulsos, aunque en principio los pulsos sometidos a esta última técnica de compresión ya vienen como pulsos cortos en general.

El desarrollo de técnicas para obtener pulsos cortos tuvo sus inicios a mediados de los años 80, teniendo potencias de transmisión bajas y empleadas mayormente en fibra multimodales [9].

El uso de sistemas LED de alta potencia se ha quedado en un nicho determinado, como se ha mencionado antes, este nicho obedece a funciones particulares de los sistemas en que se utilizan, pero pueden ser exportados a otros, se ha visto que su empleo va desde el uso de medicina a

espectroscopia y pasando por el procesamiento de señales eléctricas para su obtención, sin embargo, el poder utilizar estos sistemas en conjunto tanto de pulsos cortos como altas potencias tendría un impacto inmediato en los parámetros que hoy en día merman a las comunicaciones ópticas.

En [10] se han propuesto sistemas con LED que proporcionan anchos de pulsos de apenas ps, e incluso en [11] se han dado en fs, siendo un paso abrupto en el ancho de los pulsos enviados, por otra parte, el meollo de esto viene en la potencia, mientras que en algunas publicaciones [12] se habla de apenas unas decenas de  $\mu\text{W}$ . En [11] se tiene un arreglo con base en óptica de bloques y colimadores para tener unas decenas de Watts de potencia a costa de tener ancho de pulso asimétricos y con altas probabilidades de perder su forma, claro que esto depende de la aplicación que se tenga.

Por otra parte, el uso de estas técnicas se ha desarrollado desde hace algunas décadas con el fin de superar las tasas de transmisión y debido a los subsecuentes avances en láseres y transmisiones con modulaciones avanzadas.

El uso de pulsos cortos con altas potencias ha tenido un auge en el área de la medicina donde se utiliza para ablación de tejidos [13], en lo que respecta al proceso de generación de estos pulsos se tienen algunos esquemas utilizados, concretamente están basados en el acoplamiento de reactancias de los componentes utilizados.

Existen soluciones puntuales en el mercado que implican grandes potencias, junto con esto viene el costo de los dispositivos utilizados, una de las empresas que ofrece soluciones así es Avtech [14], el cual tiene variantes de cientos de volts [V] y ampers [A] pero en cuanto a la duración de los pulsos generados su mínimo es apenas de 2 us, cabe decir que solo es el controlador/modulador de un diodo laser, directamente integrado no se ha tenido la comercialización del dispositivo que ya es costoso aun en su versión base, costando alrededor de \$14,000 USD [14].

El dispositivo recurrente en el estado del arte son los láseres Q switch, así como el uso de osciladores y circuitos enfocados en los parámetros planteados para obtener grandes potencias en pulsos cortos transmitidos. En [15] con el uso de reflectores de Bragg basados en espejos de

semiconductor y un láser cerámico de tipo Q switch a 2.7  $\mu\text{m}$  realizaron una operación eficiente con anchos de pulso de 70 nm y una tasa de repetición de 71 KHz, con una potencia de salida promedio de 692 mW aproximadamente 69 dBm.

En [16] Se han utilizado láseres de Q switch dopados con Erblio para la generación de pulsos cortos con altas potencias en 1660 nm, lo cual en conjunto con OTDR pueden decrecer la zona muerta del dispositivo teniendo mejor resolución.

En la tabla 3.8 se comparan los tipos de generadores de pulsos más utilizados en la actualidad y sus características.

**Tabla 3.8 Dispositivos generadores de pulsos cortos y alta potencia**

Dispositivo	Potencia	Ancho de pulso	Longitud de onda	Ventajas	Desventajas
Láseres Q switch [16] [15]	100's [W]	70 nm, 34 ns	2.7 $\mu\text{m}$ , 1.6 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatibilidad con otros dispositivos</li> <li>• Potencias más altas que otros dispositivos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costoso</li> </ul>
Circuitos con base en transmisión LED [17] [18]	10's [W]	200 $\mu\text{s}$ , 100's [ns]	528 nm, 700 nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asequible</li> <li>• Uso de equipo cotidiano de laboratorio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejo en su manufactura</li> </ul>
Comercial AVtech [14]	900 [W]	50 ns	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabaja a grandes potencias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costoso</li> <li>• Solo es controlador de pulsos</li> </ul>

					para diodo laser
Basados en amplificadores [19]	1 mW	400 ns	1.08/1.00 um	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ancho de línea estrecho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costoso</li> <li>Presencia de no linealidades</li> </ul>

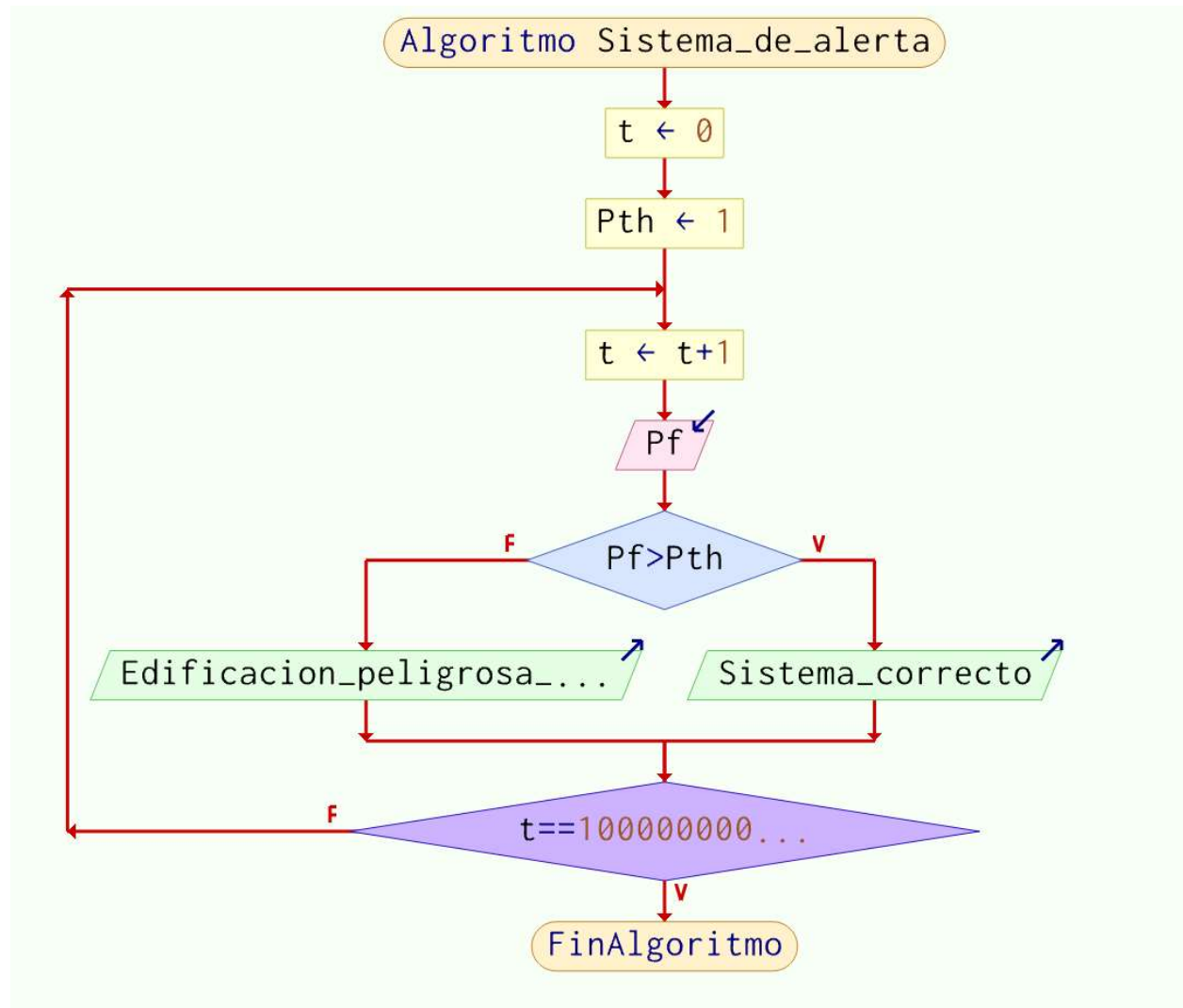
Existen más diseños y diversos trabajos que siguen de cerca esto, pero en particular los presentados en la tabla 3.8 son aquellos que han destacado del resto y han sido consistentes en diferentes publicaciones.

De [17, 18] conocemos que se pueden tener corrientes y voltajes más allá de los nominales dados por los vendedores de dispositivos, en ambas se realiza un circuito que ayuda a producir pulsos cortos con potencias de transmisión más allá de las nominales en sistemas comunicaciones o en sistemas de monitoreo. El problema de estas variantes es que la longitud de onda ocupada es menor a la que se maneja en sistemas de comunicaciones ópticas, sin embargo, en [18] se ocuparon longitudes de onda que pueden ser recibidas por un foto detector convencional y pueden viajar en fibra multimodal como las utilizadas en versiones anteriores del proyecto.

### 3.2.2 Sistema de alerta de la red de monitoreo

En la figura 3.5, se presenta un algoritmo que se plantea para el sistema de alerta que está basado en un sistema de comparación de niveles de potencia óptica en la recepción, teniendo un umbral de referencia referenciado como  $P_{th}$ , mientras que la potencia óptica recibida se plantea como  $P_f$ , mientras la potencia  $P_f$  sea mayor igual a  $P_{th}$  nos indicará que el sistema opera con normalidad, sin embargo, si  $P_f$  llega con una potencia menor a la del umbral ( $P_{th}$ ), el sistema mandará mensajes de alerta a usuario y a las autoridades correspondientes.

Mientras el sistema opere con normalidad el ciclo se repetirá en intervalos de 1 minuto para tener mayor precisión en el sistema.



3.5 Algoritmo del sistema de Alerta

Los mensajes generados por el sistema de alerta pueden generarse por medio de tecnologías 4G por medio de tarjetas SIM mediante GSM [20], utilizando tecnología Zigbee [21].

### 3.2.3 Topología de red de monitoreo e interconexión

Dado que este sistema tiene como objetivo monitorear líneas con estaciones elevadas del metro de la ciudad de México en su topología se propone el uso de redes con redundancia, como lo es el tipo de mallado o anillo, una con mejor redundancia que otra, pero a su vez con mayor costo de implementación.

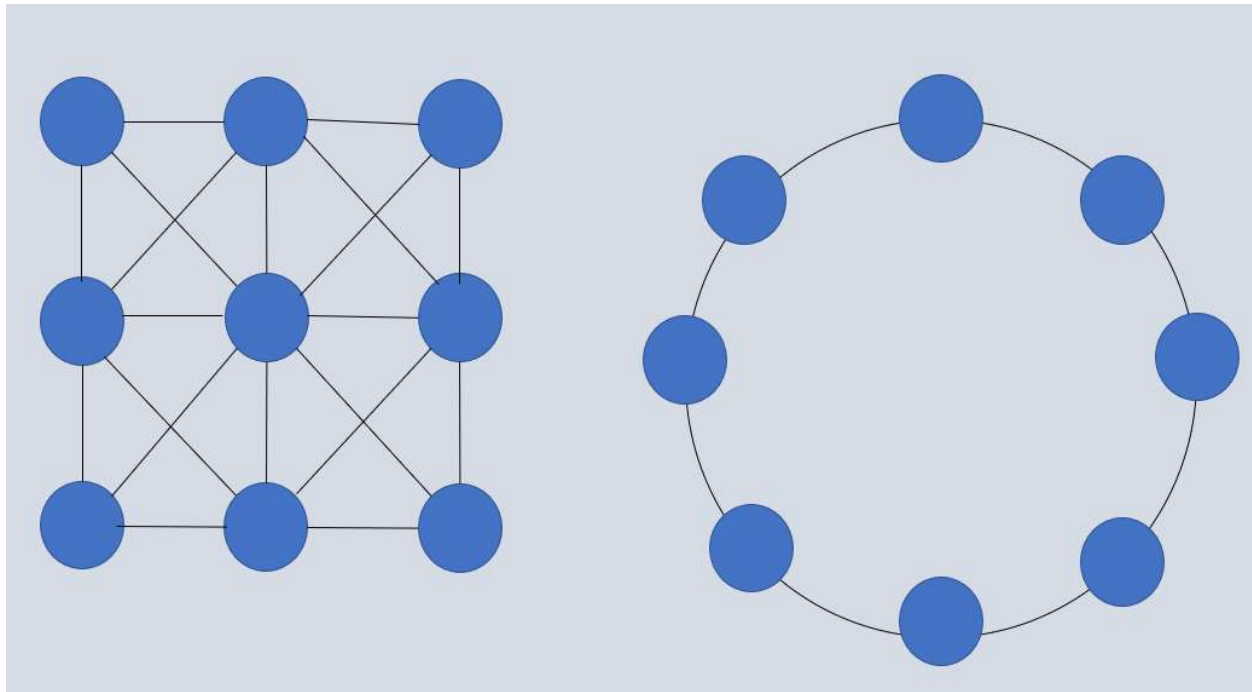


Figura 3.6 Topología de malla y de anillo

Debido a la distancia entre los enlaces por línea del sistema metro, se propone tener en un inicio la interconexión de las líneas 4, 9 y B, las cuales tienen transbordos en su recorrido, por otro lado, en la línea 12 se plantea el uso de un sistema de enlace único interconectado por medio de tecnología GSM con el sistema de alerta antes mencionado.

Las líneas 4, 9 y B se podrían utilizar en una topología mixta de anillo y malla con redundancia de hilos de fibra ubicados en las líneas del metro.

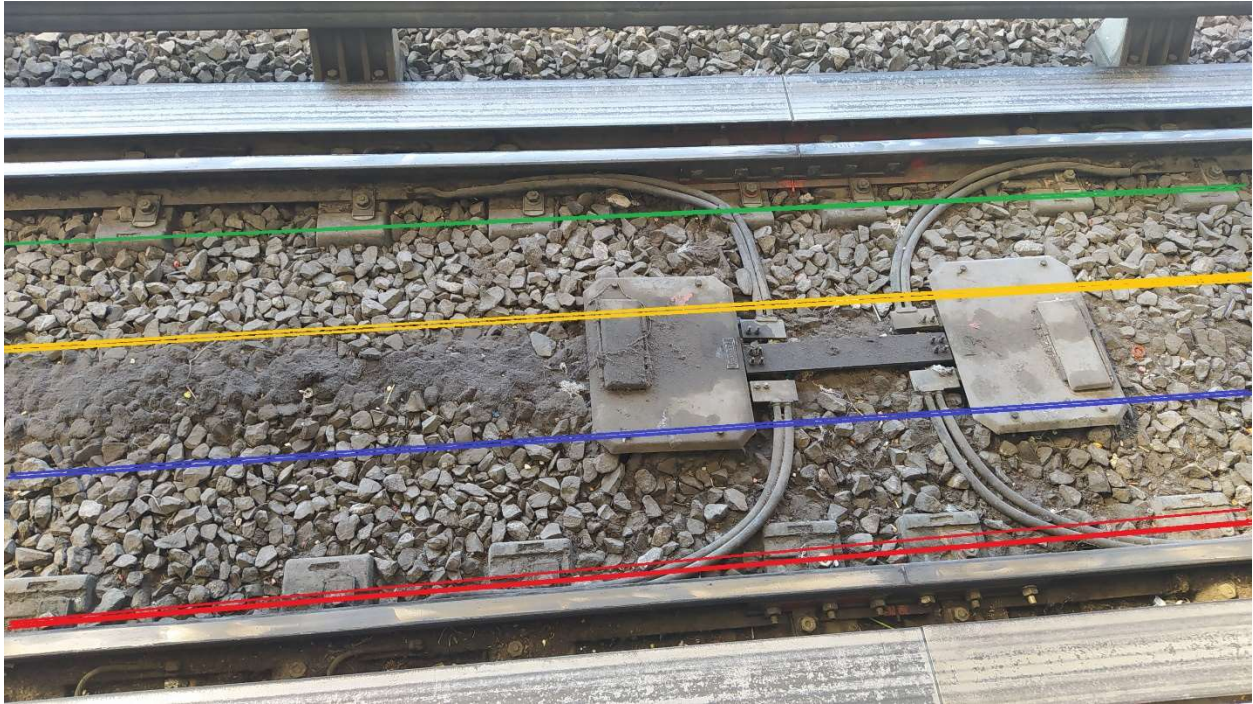


Figura 3.7 Propuesta de tendido de fibra a lo largo de las líneas del sistema colectivo metro

Se plantea que aparte de la topología de red, utilizar diferentes cables de fibra en su despliegue, teniendo redundancia dentro del mismo enlace, pues de principio desconocemos el dónde sería de mayor utilidad poner la fibra con el objetivo de registrar eventos telúricos o imperfecciones en la estructura que mermen la salud de la edificación. Se propone el uso de 4 hilos de fibra a lo largo de cada línea, dos centrales y dos a los extremos del carril.



### 3.3 Conclusiones del capítulo

1. Las de guías y protocolos a seguir para la evaluación de edificaciones en México e internacionalmente son similares a las realizadas por la organización ATC.
2. En análisis de probable costo de enlaces en función de tipo de fibra óptica y fuente (LED y láser) demostró que el costo varía mucho dependiendo de la selección de sus elementos.
3. Para el sistema colectivo Metro se tiene opciones en enlaces de tipo mono modal y multimodal, dependiendo de la longitud de onda del enlace multimodal puede tener impacto en su uso.
4. De las opciones calculadas en los presupuestos de potencia y de costo, la fibra OM1 infinacor (62.5/125) dio mejor aprovechamiento de recursos en 800 nm, una segunda opción sería el uso de fibra mono modal SMF que tiene costo semejante en el despliegue de los enlaces en las líneas del sistema colectivo metro.
5. El uso de pulsos de LED cortos y altas potencias se ha seguido estudiando para adaptarse a las nuevas tecnologías, no tanto del lado de comunicaciones ópticas, pero en el campo de instrumentación.
6. El uso de láseres Q switch es de los más utilizados debido a su funcionamiento y la capacidad de adaptabilidad a diversas tecnologías, contienen diversas formas de operación, son capaces de generar altas potencias y pulsos relativamente cortos por sí mismos de cientos de  $\mu\text{s}$ .
7. Se encontró que en diversas publicaciones se puede extender la diferencia de potencial y corrientes nominales por decenas de veces mientras sea en periodos cortos de funcionamiento, aunque aún hoy no se tiene un diseño pleno para su ejecución en sistemas de comunicaciones ópticas.
8. Los dispositivos desarrollados para su uso con LED son de potencias rondando las decenas y centenas mW, las longitudes de onda empleadas en ambos casos rondan frecuencias del espectro en donde la fibra óptica para comunicaciones tiene mayores atenuaciones, en caso de su uso podrían mermar la señal no solo en potencia sino incluso provocar efectos no lineales.



### Capítulo 3: Propuesta conceptual de sistema de monitoreo de daño estructural en líneas del metro

9. Se desarrolló un algoritmo basado en potencias de referencia para generar alarmas en caso de baja potencia o pérdida de señal en el sistema de monitoreo.
10. Se plantea un uso de topología mixta de anillo y malla para el despliegue de la red de sensado entre las líneas 4,9 y B, dejando a la línea 12 como enlace único de monitoreo remoto por medio de GSM.

### 3.4 Referencias

- [1] V. Kostoglodov y J. F. Pacheco, «CIEN AÑOS DE SISMICIDAD EN MEXICO,» Geofísica UNAM, 1999. [En línea]. Available: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>. [Último acceso: 16 Mayo 2022].
- [2] M. Rodríguez y E. Castrillón, Manual de Evaluación Postsísmica de la Seguridad Estrictural de Edificaciones, Ciudad de México: UNAM, 1995.
- [3] Applied Technology Council , ATC-21-T: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards Training Manual, Redwood City, 2005.
- [4] Y. NAKANO, M. MAEDA, H. KURAMOTO y M. MURAKAMI, «GUIDELINE FOR POST-EARTHQUAKE DAMAGE EVALUATION AND REHABILITATION OF RC BUILDINGS IN JAPAN,» de *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 2004.
- [5] Sistema Colectivo METRO, «Metro CDMX,» [En línea]. Available: <https://www.metro.cdmx.gob.mx/estacion-por-uso-y-tipo>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [6] CDMX Sistema Colectivo Metro, «METRO: Longitud por Estacion,» [En línea]. Available: <https://metro.cdmx.gob.mx/longitud-de-estacion>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [7] Horiba, «Horiba,» [En línea]. Available: [https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Fluorescence/nanoled\\_brochure.pdf](https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Fluorescence/nanoled_brochure.pdf). [Último acceso: 07 09 2021].
- [8] R. Paschotta, «RP Photonics Encyclopedia,» 10 2008. [En línea]. Available: [https://www.rp-photonics.com/ultrashort\\_pulses.html#:~:text=Generation%20of%20Ultrashort%20Pulses,or%20with%20free%20electron%20lasers..](https://www.rp-photonics.com/ultrashort_pulses.html#:~:text=Generation%20of%20Ultrashort%20Pulses,or%20with%20free%20electron%20lasers..) [Último acceso: 8 9 2021].
- [9] P. French, «The generation og ultrashort laser pulses,» *Report on Progress in Physics*, vol. 58, nº 2, 1995.
- [10] J. A. Tatum, J. W. Jennings y D. L. MacFalane, «Compact, Inexpensive, visible diode laser source of high repetition rate picosecond pulses,» *The Review of Scientific Instruments*, vol. 63, nº 5, pp. 2950-2953, 1992.
- [11] M. Seidel, J. Brons, G. Arisholm, K. Fritsch, V. Pervak y O. Pronin, «Efficient High-Power Ultrashort Pulse Compression in Self-defocusing Bulk media,» *Scientific Reports*, vol. 7, nº 1, p. 1410, 2017.
- [12] C. D. McGuinness, K. Sagoo y D. McLoskey, «Selective excitation of tryptophan fluorescence decay im proteins using a subnanosecond 295 nm light-emitting diode and time- correlated single-phoon counting,» *Applied science letters*, vol. 86, 2005.
- [13] B. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchick y &. e. al, «Optical ablation by high-power short-pulse lasers,» *Journal of Optical Society*, vol. 13, nº 2, 1996.

### Capítulo 3: Propuesta conceptual de sistema de monitoreo de daño estructural en líneas del metro

- [14] A. T. Pulse. [En línea]. Available: <http://www.avtechpulse.com/current/av-106a/>. [Último acceso: 15 Octubre 2021].
- [15] W. Li, H. Haitao y e. al, «High Power and short pulse width operation of passibly W switched Er:LU2O3 Ceramic laser at 2.7  $\mu\text{m}$ ,» *Applied Science*, vol. 8, 2018.
- [16] H. Kee, G. P. Lees y T. P. Newson, «Distributed optical fibre sensing at 1.65  $\mu\text{m}$  using a Q switched fibre laser,» *Proceedings of SPEI*, 2000.
- [17] W. Bakker, B. Hofland, E. de Almeida, G. Oldenziel y E. F. J-Overmars, «Pulsed LED line light for large-scale PIV-development and use in wave load measurements,» *Measurements Science & Technology*, vol. 32, nº 11, 2021.
- [18] C. Willert, B. Stasicki, J. Klinner y S. Moessner, «Pulsed Operation of high-power light emitting diodes for imaging flow velocimetry,» *Measumerent Science & Technology*, vol. 21, 2010.
- [19] C. Guillaume, J. Yves, M. Jean-Claude y &. e. al, «High Power Pulsed Sources Based on Fiber Amplifiers,» de *International Conference on Space Optics* , Toulouse, 2004.
- [20] V. Singh, Karan, V. Panwar, M. Kaur, N. Rakesh y P. Nand, «Global System for Mobile Communication based Automatic Alarm System for Disaster Management,» *2022 9th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pp. 560-563, 2022.
- [21] V. Sittakul, S. Pasakawee y P. Kovintavewa, «Data Transmission of Zigbee over Fiber,» *2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, pp. 1-4, 2019.

## Capítulo 4. Análisis de la elongación y fuerza de rotura de las fibras ópticas

### 4.1 Factores implícitos en la rotura de la fibra óptica bajo tracción

Típicamente el material con el cual está hecha la fibra óptica es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), tanto en su núcleo (*core*) como en su recubrimiento (*cladding*), ambos pueden ser de diversos diámetros, teniendo en cuenta que el índice de refracción del núcleo debe ser un poco mayor al del revestimiento, propiciando la propagación de uno o más modos electromagnéticos dentro de la fibra.

Debido a la naturaleza de los materiales, los factores que comúnmente propician pérdidas y quitan funcionalidad a medios de transmisión “convencionales” como es el par de cobre trenzado, el cable coaxial o el mismo espacio libre no causan ningún impedimento a la fibra óptica para su funcionalidad, pero existen otros factores que definitivamente afectan a la fibra óptica debido a que sigue siendo un medio guiado, el principal es la ruptura de los cables.

La resistencia mecánica que tiene la sílice en forma de fibra óptica es un aspecto fundamental que se debe tener en consideración para su uso como sensor de fallas estructurales. Mediante pruebas de tracción se sabe que la fibra tiende a tener una rotura tajante, esto puesto que es un material cerámico tiene una curva de esfuerzo-deformación considerablemente diferente a otros materiales (visualizada en la figura 4.1).

## Ceramics, glasses, and concrete

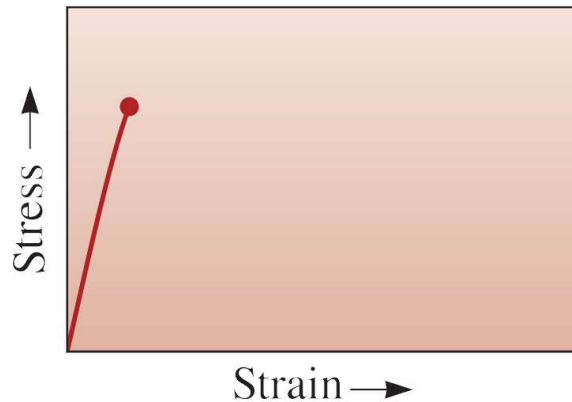


Figura 4.1. Esfuerzo (stress) vs. Deformación (strain) para materiales cerámicos, vidrios y concreto [1]

En diversos artículos se investigó sobre sus propiedades y la forma en que se da una rotura de fibra debido a esfuerzos de tensión en la fibra, siendo entre los factores más recurridos la fatiga debido a la carga ya sea en su instalación o pasados los años, así mismo, debido a los efectos de tensión sobre la fibra se tiene un estimado de cuando puede durar un tendido de fibra óptica antes de que esta tienda a degradarse e inevitablemente romperse. En la figura 4.2 se encuentra esta representación, esta figura fue formada a través de 3 modelos cinéticos que tienen como factor común la fuerza de tensión aplicada y los cuales son extrapolados a 25 años y tensiones de hasta 7 GPa.

En estos modelos se tienen factores que afectan la resistencia mecánica de la fibra y por ende su vida útil, siendo el principal la tensión, esta puede ser causada por diversos factores que están en el ambiente, fenómenos naturales o el tiempo de vida causando pérdida de las propiedades del material.

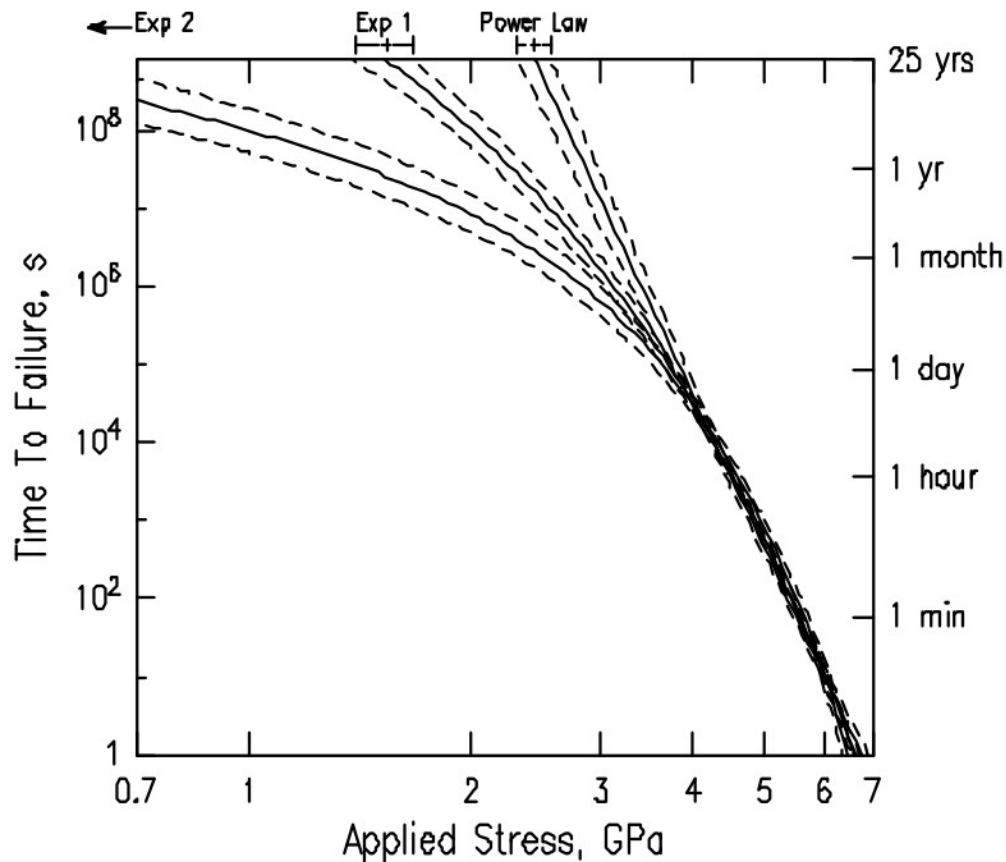


Figura 4.2 Tiempo de vida de una fibra óptica en función de la tensión aplicada [2]

Debido a que las pruebas a las que son sometidas las fibras ópticas para aprobarse para venta y uso en la industria apenas tienden a ser entre  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{1}{4}$  de la fuerza de tensión máxima que puede soportar, no hay datos concretos sobre esta fuerza máxima de tensión por parte de las compañías que fabrican y comercializan la fibra.

#### 4.2 Prueba de tensión aplicada a fibras ópticas después de su manufactura (tensile proof test)

Según la ITU en su norma ITU-T L.10 *CABLES DE FIBRA ÓPTICA PARA APLICACIONES EN CONDUCTOS, EN GALERÍAS Y EN TENDIDOS AÉREOS Y ENTERRADOS* [3] se hace la recomendación de realizar pruebas mecánicas en la fibra óptica, estas pruebas están bajo el estándar 794-1-E1

[4] de la CIE (Comisión internacional electrotécnica) da los pasos a seguir para realizar pruebas mecánicas en cables de fibra óptica, por otra parte según un informe de FIBREMEX [5] detalla el uso de las pruebas de tensión por la que pasa la fibra óptica.

Según el informe de FIBREMEX se realizan 6 pruebas mecánicas principales:

- Resistencia a la tensión
- Resistencia a la compresión
- Resistencia al impacto
- Resistencia a los dobleces repetidos
- Resistencia a la torsión
- Resistencia a la flexión

En el caso de la prueba de resistencia a la tensión se hizo mediante una máquina de tracción, el cual se muestra en la figura 4.3. En esta prueba de tracción se miden dos cualidades de la fibra óptica.



Figura 4.3 Máquina utilizada para prueba de resistencia a la tensión bajo la norma internacional ECI [5]

El sistema que se utiliza es un sistema de poleas que contienen dos motores los cuales dan al sistema la tensión necesaria para la prueba en la fibra, esta fibra es pasada por lo menos por 4

poleas. Así mismo, se realizan in situ mediciones de fuerza instantánea en la fibra y de atenuación debido a la tensión.

Según este informe se tiene una tensión a lo largo de 300 m de fibra mono modal con valor de 100 KPSI (700 MPa aproximadamente), validando esta información se toma en cuenta la atenuación que sufre la fibra al pasar de un nivel de tensión inicial iniciado en 100 N hasta llegar a los 500 N, con pasos de 50 N/s y manteniendo los niveles de 100 en 100 con el objetivo de medir la atenuación en la fibra óptica de forma correcta al estabilizar la fibra con una tensión determinada.

Esta prueba se denomina una prueba no destructiva, pues tiene como fin el simular el proceso de la fibra óptica en su tendido. La fibra óptica utilizada en estos casos es el cable preparado para tendido, por lo cual tiene elementos que ayudan a su resistencia mecánica, sin embargo, es un indicio de cuánto puede llegar a soportar.

Recordemos que en los ensayos de tracción que se realizan se tienen cantidades significativas de fibra óptica que se pone a prueba, además, las fuerzas tienden a ser mayores en los extremos de la fibra por lo que tienden a ser puntos críticos dentro de las pruebas y en operación, teniendo menor probabilidad de ruptura en el medio del tendido.

Además, existen otras normas para probar la fuerza de tensión que resiste una fibra óptica, típicamente las pruebas coinciden en tener niveles de tensión de hasta 100 Kpsi (700 MPa), a los cuales está sometida la fibra en su instalación:

- ASTM D3379-75(1989) e1: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials [6]
- TIA-455(2014) General requirements for standard test procedures for optical fibers, cables, transducers, sensors, connecting and terminating devices, and other fiber optic components [7]

### 4.2.1 Características estadísticas de los datos obtenidos en las pruebas de tensión

El acercamiento matemático que se ha dado a la fuerza de tensión y elongación que resiste una fibra óptica, obtenidas en las pruebas de tensión ha sido estadístico y probabilístico, tratando de



obtener patrones o medios con los cuales sugerir tendencias en las pruebas para tipos específicos de fibras, tomando en cuenta longitud, grosor, material del núcleo, revestimiento y recubrimiento.

Algunos de las medidas de tendencia central, dispersión y gráficos que se utilizan en el presente estudio son las siguientes [8, 9]:

**Media  $\mu$ :** Se considera como un promedio aritmético de  $i$  datos, el cual trata de representar el valor medio de los datos de los que proviene, se puede calcular como:

$$\mu = \frac{\sum_{j=0}^i X_j}{i} \quad (4-1)$$

**Mediana:** Es el valor que divide exactamente a la mitad a un conjunto de datos, para esto, los datos deben de estar ordenados de mayor a menor, en caso de tener un número impar de muestras, la mediana será aquel valor que esté justo a la mitad de los datos, en caso de tener un número par de datos, la mediana será el promedio de los dos valores centrales.

**Moda:** Es el valor que más se repite en un número determinado de datos.

**Varianza:** Es una medida de dispersión que es definida por la probabilidad, la varianza es la media aritmética de las desviaciones cuadráticas con relación a la media aritmética general  $\mu$  [9], definida como:

$$s^2 = \frac{\sum_{j=0}^i (x_j - \mu)^2}{i} \quad (4-2)$$

**Desviación Estándar:** Es una medida de dispersión que proporciona el valor promedio de las desviaciones de los elementos, con relación a la media aritmética [9], se calcula como:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (4-3)$$

**Rango:** Diferencia entre el dato mayor y dato menor de un conjunto de valores.

**Clase:** se puede obtener el número de clases en que estará dividido el rango, con el objetivo de agrupar diversas muestras de un evento en un intervalo denominado "clase".

Se puede calcular teniendo en cuenta que  $i$  es el número total de muestras:

$$\# \text{ de clases} = 1 + 3.3 \log (i) \quad (4-4)$$

Donde el resultado se puede aproximar al número entero inmediato mayor o menor.

El ancho de las clases está definido como:

$$W = \frac{\text{Rango}}{\# \text{ de clases}} \quad (4-5)$$

**Histograma:** gráfico de sucesión de rectángulos adyacentes, cada uno de ellos representa una clase, a su vez cada clase representará frecuencias de un evento continuo que se estudia. En el eje de las abscisas se ponen las clases y en el eje ordenado la frecuencia de repetición o frecuencia relativa *fi*.

### 4.3 Rotura de fibra óptica como un indicador de agrietamiento estructural

#### 4.3.1 Estimación de fuerza de rotura en fibras ópticas según tipo y parámetros de fibra

Se puede estimar la fuerza de rotura de las fibras que se emplean y con nuevos datos de estimación se puede calcular la fuerza de rotura de la fibra. Debido a que en su proceso de fabricación se pueden tener aberraciones en la fibra, como lo son pequeñas fisuras o burbujas de aire nanométricas existe la posibilidad de tener fibra óptica con puntos débiles dentro de su estructura.

Suponiendo que se utilizarían diversas fibras ópticas se puede obtener un estimado para cada fibra óptica, según estudios de Medrano [10], la fibra óptica puede llegar a alcanzar tensiones de 12 GPa, en la industria es altamente improbable que se tenga tal resistencia a la tensión, pues debido al modo en que se fabrica la fibra óptica, las pruebas de tensión (tensile proof test), cableado, empaquetado y transporte, esta puede tender a tener micro fallas estudiadas por diversas compañías especializadas en la manufactura de la fibra óptica [11-13].

Medrano [10] únicamente propicia cálculos teóricos sin llegar a verificarlos en un experimento sustentado, se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de encontrar resultados similares concluyendo sin éxito.

Chen y Chang [14] obtuvieron resultados experimentales de rotura de fibra con fuerza de tensión de 3.1 y 5.1 GPa, las cuales están en función de la sección transversal de la fibra óptica utilizada.

Hay variedad en cuanto a la fuerza en que se llega a la rotura en una fibra debido a la tensión.

Considerando que el esfuerzo  $\sigma$  es una relación entre la fuerza aplicada en la sección transversal  $A$  de un objeto, podemos conocer la fuerza de este esfuerzo mediante la siguiente ecuación:

$$f = \sigma * A \quad (4-6)$$

Conociendo que el área de la sección transversal  $A$  de la fibra corresponde al área de una circunferencia tomando en cuenta las dos secciones principales de la fibra (núcleo y revestimiento), es posible estimar la fuerza máxima de rotura  $f$  en la fibra.

En la tabla 4.1 se da una lista de fuerza de rotura con base en área de la sección transversal  $A$  de la fibra y el esfuerzo  $\sigma$ , partiendo del intervalo de 2.1 a 5.1 GPa, para una fibra multimodal de 62.5/125 y en general con cualquier fibra que tenga 125  $\mu\text{m}$  de diámetro de sílice en conjunto de núcleo y revestimiento.

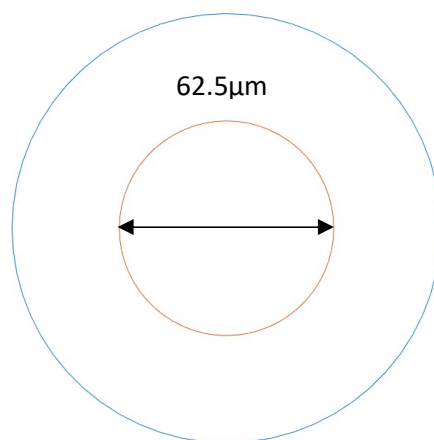


Figura 4.4 Fibra óptica con diámetro 62.5/125  $\mu\text{m}$  núcleo/revestimiento

#### Capítulo 4: Análisis de la elongación y fuerza de rotura de las fibras ópticas

Se utilizó la ecuación 4-6 para estimar teóricamente las fuerzas de rotura en función de niveles de tensión  $\sigma$  aplicados en la sección transversal de la fibra óptica, dando como resultado la tabla 4.1 y 4.2

**Tabla 4.1 Fuerza de rotura para la fibra SMF-28 y OEM1 (62.5/125  $\mu$ ) según estimaciones de Cheng et al [14].**

Esfuerzo [GPa]	Área[m <sup>2</sup> ]	Fuerza de rotura $f$ [N]
3.1	$12.271 \times 10^{-9}$	38.42
4.1	$12.271 \times 10^{-9}$	50.31
5.1	$12.271 \times 10^{-9}$	62.58

Para fibras de mayor diámetro se puede seguir con esta aproximación, continuando con valores de tensiones en el rango señalado y cambiando el área de la fibra.

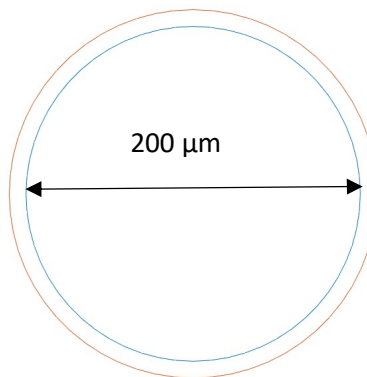


Figura 4.5 Fibra óptica con 200/220  $\mu\text{m}$  de núcleo/revestimiento

**Tabla 4.2 Fuerza de rotura para la fibra 200/220  $\mu\text{m}$  según estimaciones de Cheng et al [14].**

Esfuerzo [GPa]	Área[m <sup>2</sup> ]	Fuerza de rotura $f$ [N]
3.1	$38.0132 \times 10^{-9}$	117.84
4.1	$38.0132 \times 10^{-9}$	155.85
5.1	$38.0132 \times 10^{-9}$	193.86

Se considera que estos resultados teóricos son con base en fibras “óptimas”, las cuales pueden tener fallas en su proceso de manufactura, típicamente de nanómetros, por lo cual las fuerzas calculadas en las tablas 4.1 y 4.2 pueden ser mucho menores o mayores según sea su nivel de perfección en el proceso de manufactura.

Así mismo, se investigaron diversos artículos en los cuales se han comprobado experimentalmente la fuerza de tensión de rotura (expresada en GPa).

En [13] hablan sobre la probabilidad de falla en enlaces de fibra óptica, puntualizan que mientras mayor sea la longitud de la fibra es mayor la probabilidad de falla, la forma de hacerlo era poniendo tramos de 20 m en las máquinas de tensión, si la fibra óptica se rompía con tensiones menores a 560 kpsi (3.8 GPa) se registraban las fallas, esto se hizo a lo largo de 4000 km de fibra óptica.

Hicieron pruebas de dobleces de fibra óptica en donde encontraron que la probabilidad de falla debido a tracción en 20 metros es equivalente a la probabilidad de falla debido a flexión en 100 m.

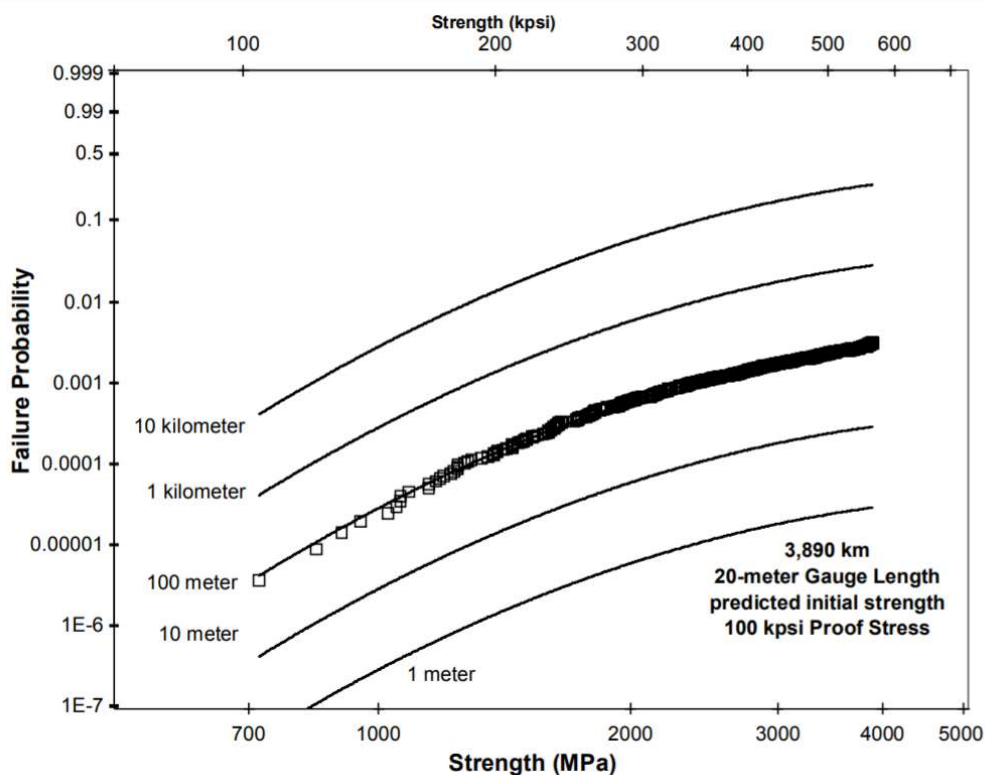


Figura 4.6 Probabilidad de falla vs fuerza aplicada [13]

Casos como el registrado en la figura 4.6, se repiten en diversos escenarios con diferentes longitudes de fibra, dando que la fibra óptica tiende a resistir mayor estrés cuando esta es sometida a pruebas de flexión que cuando se somete a pruebas de tensión debido a tracción.

En [11] es el artículo del cual se basó [13], delimitan y explican el proceso con el cuál hicieron las pruebas de tensión (tensile strength proof) hasta 350 kpsi (2.45 GPa) y de igual forma se ponían a prueba 20 metros de fibra continua, alcanzando un total de 3800 km, si es que la fibra se rompía antes de llegar a los 350 kpsi se registraba en una gráfica de Weibull. Cabe destacar que este artículo tenía como propósito el utilizar los datos para tener un modelo predictivo de fallas en la fibra óptica y obtener probabilidades de rotura.

Después utilizaron la misma fibra y obtuvieron que la fatiga provocada por la tensión aplicada en la fibra óptica hizo que la resistencia mecánica de esta fuera reducida, teniendo fallas en esfuerzos menores a lo que se calcularon. La figura 4.7, ilustra esta tendencia para los datos que graficaron.

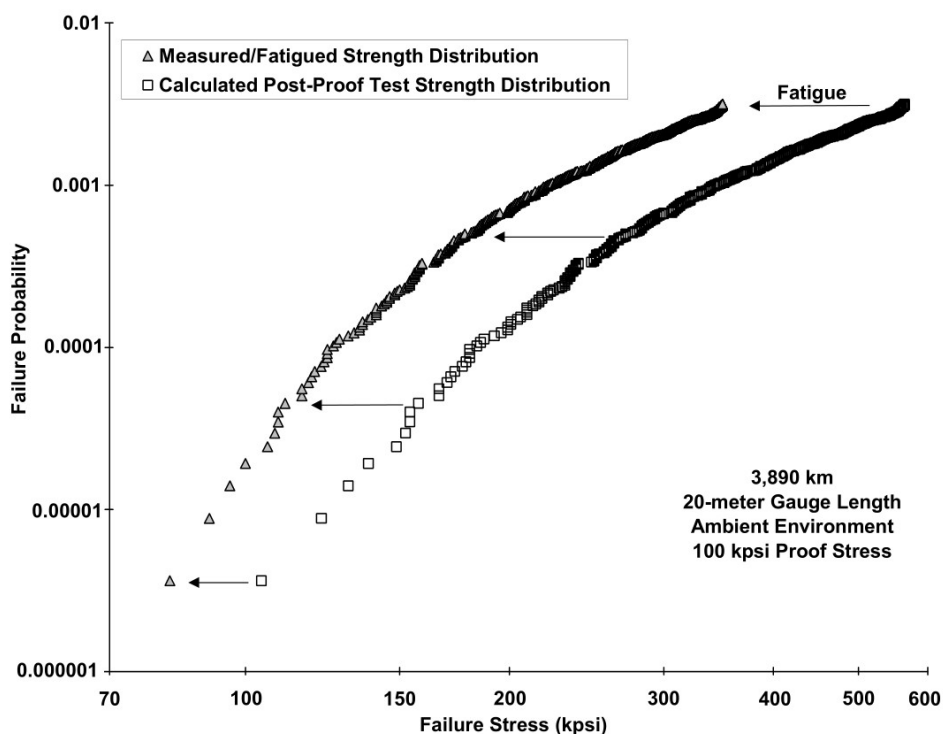


Figura 4.7 Probabilidad de falla vs Tensión aplica en fibra óptica [11]

En [12] nos hablan sobre el diseño de la máquina de pruebas de tensión (tensile proof test) que fue pensado para su uso en años posteriores, haciendo posible probar largas extensiones de fibra óptica en busca de falla, en este artículo utilizan la función de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  como modelo predictivo de falla en longitudes de fibra óptica. En este hicieron lo primero experimentos con longitudes de 20 metros de fibra óptica probando un total de 380 km aproximadamente, provocando fuerzas de tensión de hasta 600 kpsi (4.2 GPa) y obteniendo modelos de probabilidad de falla.

En estos artículos resaltan que en mientras mayor sea la longitud de la fibra en el rango metros a kilómetros, se necesita una menor fuerza de tensión que provoque la falla en esta.

Se encontraron otros artículos con pruebas en fibra óptica SMF de tipo destructivas, llevando a la fibra hasta su rotura. En estos varían las longitudes utilizadas y su aplicación final.

Realizaron pruebas en fibras SMF 28 [15], comparando la fuerza de tensión  $f$  que puede soportar una fibra con y sin recubrimiento, la longitud de las muestras de fibra era de 10 cm y realizaron un total de 20 pruebas teniendo un valor medio de fuerza de tensión de rotura de 4.72 GPa.

En 2020 [16] desarrollaron un método para quitar recubrimiento a la fibra óptica por medio de un gel a base de cloruro de metileno y metanol, en este realizaron pruebas de tensión en fibra óptica hasta su rotura para comparar ambas fuerzas con y sin recubrimiento, las muestras de fibra utilizadas fueron de 50 cm de longitud, y obtuvieron fuerzas de rotura de 5.48 GPa de media con fibra óptica monomodal con recubrimiento acrílico.

En 2019 [17], realizaron estudios con fibra óptica monomodal buscando la fuerza de rotura de esta para diferentes temperaturas con y sin recubrimiento, de las cuales a temperatura ambiente (24°C) realizaron pruebas con 2 longitudes de fibra, 6 y 9 cm, obteniendo fuerzas de rotura de 5.79 GPa para 6 cm y 5.72 GPa para 9 cm.

Anteriormente Cheng y Chan [14] habían utilizado fibras monomodo con recubrimiento acrílico con longitud de 20 cm y teniendo fuerzas de rotura de 4.5 GPa de media y una fuerza máxima de 5.1 GPa.

Por otra parte, Delobelle [18], realizó experimentos con fibra smf 28, obteniendo una fuerza promedio de rotura de 5.4 GPa. La longitud de sus muestras fue 3 cm con 20 muestras utilizadas en el experimento, con una fuerza de tensión de 5.4 GPa comprobó por medio de un análisis estadístico de Weibull que las fibras tienen un 70% de rotura y que con poco menos de 6 GPa esta rotura es prácticamente inminente, el paso a seguir es ver estos resultados en fibras adheridas a alguna superficie, pues las pruebas y los resultados obtenidos en las publicaciones hablan de fuerzas de tensión sometiendo a la fibra a pruebas de tracción.

**Tabla 4.3 Fuerzas de tensión de rotura de fibras ópticas SMF-28 encontradas en la literatura clasificadas de acuerdo con su longitud vs. Fuerza de rotura experimental.**

Longitud de la muestra [cm]	Fuerza de tensión de rotura promedio [GPa]	Fabricante	Año de publicación	Cita
3	5.4	Corning	2008	[18]
6	5.79	---	2019	[17]
9	5.72	---	2019	[17]
10	4.72	POFC	2003	[15]
20	5.1	POFC	2002	[14]
50	5.48	---	2020	[16]

La relación entre la longitud de los experimentos que se han realizado en los artículos mencionados varía desde muestras de 3 cm hasta de 50 cm, pero tienen resultados afines en cuanto a la fuerza de tensión a la cual falla entre 4 y 5 GPa, mientras que en pruebas de mayor longitud de fibra óptica se tiene fallas de la fibra con menores, los resultados dados por las publicaciones de Corning dan fuerzas de tensión de hasta 4.2 GPa con longitudes de 20 m en las cuales falla la fibra.



En cuanto al material de recubrimiento (*coating*) es un elemento que provee a la fibra de protección, pero que en cuanto a resistencia mecánica tiende a ser más débil que la sílice, típicamente los materiales con los cuales se recubren a la fibra es el acrílico y poliamida.

Según los artículos vistos este material en el recubrimiento provee de mayor resistencia mecánica a la fibra óptica, aunque no se tiene clara la magnitud de esta “ayuda”, pues el proceso que se utiliza para su remoción de la fibra es variado y puede afectar el material del núcleo y revestimiento.

### 4.3.2 Estimación de ancho de grieta en correlación con fibra empleada

El impacto que tienen las grietas en estructuras civiles se divide en 5 categorías principales que se denotan en milímetros de apertura en las grietas, siendo apenas 0.2 mm el nivel de menor impacto y con más de 3 mm una afectación grave que puede poner en riesgo a la estructura, la cual dependerá de se encuentre la grieta o no un muro de carga o que tenga un valor estructural significativo en la edificación.

En trabajos anteriores [19, 20] y publicaciones [21] dadas a partir de este proyecto se han recabado datos de roturas de fibra utilizada como sensor (testigo) de abertura de una grieta estructural. Podemos decir que con base en la naturaleza de la sílice y al ser un material frágil se tiene un porcentaje muy bajo de elongación debido a tracción.

Por otro lado, utilizando la ecuación de elongación basada en el módulo de Young de la fibra óptica se puede tener un intervalo máximo de rotura con lo cual se puede tener una primera aproximación y mediante la parte experimental comparar.

El módulo de Young es una propiedad de los materiales, en el caso de los materiales cerámicos como lo son la fibra óptica pueden ser de alto valor, considerando esto sabemos que el factor de elongación de los materiales va ligado a la ley de Hook, la cual relaciona la elongación de los materiales debido a tensión en el material.

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (4-7)$$

- Donde  $E$  es el módulo de Young
- $\sigma$  es la tensión en el material
- $e$  es elongación del material

La cual se puede expresar mediante las siguientes relaciones:

$$\sigma = \frac{f}{A} \text{ [Pa]} \quad (4-8)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \left[ \frac{mm}{mm} \right] \quad (4-9)$$

Donde:

- $f$  es la fuerza
- $A$  el área
- $\Delta l$  es el cambio en la longitud producido por la tensión
- $l_0$  es la longitud inicial del material

El módulo de Young de la sílice es aproximadamente 72 GPa [1] en sílice sin procesar, no existe registro correcto del módulo para la fibra óptica, pero se puede inferir que debido a la propiedad del material pueda ser considerado para el cálculo teórico, con lo que se aplica la siguiente ecuación.

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{\frac{f}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (4-10)$$

Y despejando la elongación de la fibra nos quedaría la siguiente ecuación:

$$\Delta l = \frac{f}{A * E} * l_0 \quad (4-11)$$

Debido a que en los materiales cerámicos la región elástica es una función lineal, suponemos que la ruptura del material pasa al salir de esta zona de inmediato, como se puede observar en la figura 4.1.

Considerando la ecuación 4-7, se calculó la elongación para diversas fuerzas de tensión, se llegó a la tabla 4.4, que relaciona la fuerza de tensión en la sección transversal de la fibra y el porcentaje de elongación.

**Tabla 4.4 Resultados teóricos Tensión vs Elongación de fibra óptica SMF-28 basados en ec. 4-10**

Tensión $\sigma$ [GPa]	Elongación $e$ [%]
3.1	4.3
4.1	5.69
5	6.94

Existe discrepancia entre los resultados teóricos y en publicaciones encontradas en la literatura. En pruebas de tensión publicadas por la ITU en su recomendación ITU-T L.14 [22] este valor es de 0.4% en su máxima elongación  $e$ , por otra parte, Debolle et al [18] muestra resultados donde las fibras ópticas de sílice son capaces de llegar a una deformación de hasta 7.5 % y generaliza que el rango de deformación que estas pueden ir de un 2% a un 8 % más de su longitud original.

Si se considera que la fibra sufre estiramiento en un tramo de fibra de 100 mm, aplicando la ecuación 4-11 con el intervalo de la fibra de 100 mm se puede obtener los valores de la tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Resultados teóricos de anchos de grieta que la fibra óptica SMF-28 es capaz de detectar aplicando tensión  $\sigma$  y provocando su elongación  $e$ , basados en ec. 4-11**

Tensión $\sigma$ [GPa]	Elongación $e$ [%]	Ancho de grieta [mm]
3.1	4.3	4.3
4.1	5.69	5.6
5.1	6.94	6.94

De las publicaciones encontradas sobre el tema, se tienen discrepancias importantes, tanto en datos máximos de elongación como en fuerzas de rotura registradas, el tiempo entre publicaciones es importante, teniendo hasta 10 años de diferencia, los procesos de manufactura de la fibra óptica son optimizados por las empresas con el objetivo de evitar defectos en la fibra y costos, por lo cual se puede afirmar que debido a esta diferencia tecnológica en el proceso las fibras pueden cambiar en la cantidad de defectos y propiedades incluso siendo del mismo fabricante, provocando discrepancia en los resultados experimentales de las publicaciones.

Los valores calculados teóricamente en las tablas 4.4 y 4.5 son valores sujetos a una fuerza de tensión aplicada sobre la fibra óptica.

El uso de la fibra como testigo de daño estructural en esta investigación es anclando la fibra a un material de superficie rugosa/áspera como lo es la mampostería y que este anclaje se da mediante el uso de pegamento epóxico que provee de anclaje parcial, en etapas pasadas de investigación se ha visto que el uso de este pegamento es tiene la propiedad de anclar la fibra a la superficie en cuestión, típicamente el pegamento ancla a la fibra a la superficie, pero no previene de que esta se resbale dentro del pegamento, haciendo que la grieta hecha en un principio sea de mayor ancho, hasta antes de su rotura.

Por otra parte, se cree que la sílice es capaz de someterse a elongaciones tales que sea capaz de detectar grietas de 3 a 5 mm que en edificaciones implican riesgos a la salud estructural según [23]. Y se tiene la teoría que esta elongación pudiera ser mayor o menor en proporcionalidad a la medida (área de la sección transversal) de la fibra.

#### 4.4. Conclusiones del capítulo

1. Las pruebas de resistencia de tensión para la fibra óptica que sale de la fábrica son realizadas con fuerzas de apenas  $\frac{1}{4}$  de la magnitud que puede soportar la fibra, dando paso a un sinnúmero de aplicaciones potenciales derivadas de esto.
2. Se estima que con base en la ecuación 4-1 la fuerza teórica de rotura  $f$  para fibras de 125  $\mu\text{m}$  de sílice en núcleo-revestimiento son de 50 a 70 N, fibras con 220  $\mu\text{m}$  de sílice en núcleo-revestimiento tienen una fuerza de rotura  $f$  máxima de 190 N.
3. Debido a los defectos siempre en el material de la fibra a mayor longitud de fibra se tienen una fuerza de rotura menor.
4. Así mismo, la constante de elasticidad del material en la cual se basan los cálculos de elongación formulada por la ley de Hook, esta “constante” varía dependiendo de la longitud de la fibra óptica.
5. La elongación  $e$  causada por la fuerza de tensión  $\sigma$  en la fibra varía en función de la fuerza aplicada a esta y en el caso de nuestra investigación afecta el uso de adhesivos para el anclaje de la fibra a la mampostería.
6. Las predicciones teóricas de elongación máxima  $e$  en fibras de 100 mm van de 4.6 % a 6.9%.

#### 4.5 Referencias

- [1] D. R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*, Stamford: Cengage Learning, Inc., 2010.
- [2] J. M. Matthewson, «Fiber Optics Reliability and Testing,» *SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology*, vol. CR50, pp. 3-31, 1993.
- [3] ITU-T, *CABLES DE FIBRA ÓPTICA PARA APLICACIONES EN CONDUCTOS, EN GALERÍAS Y EN TENDIDOS AÉREOS Y ENTERRADOS*, Ginebra, 1992.
- [4] IEC , *Part 1-2: Generic specification – Basic optical cable test procedures – General Guidance*, Ginebra, 2021.
- [5] FiberLab Laboratorio de Fibra Óptica, «Informe de Ensayos FBL-IE-A129-2020,» Querétaro, 2020.
- [6] American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials*, 1989.
- [7] Telecommunications Industry Association, *TIA-455 General requirements for standar test procedures for optical fibers, cables, transducers, sensors, connecting and terminating devices, and other fiber optics components*, 2014.
- [8] A. Rustom, *ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA, PROBABILIDAD E INFERENCIA. Una visión conceptual y aplicada.*, Santiago de Chile, 2012.
- [9] C. Salazar y S. Del Castillo, *Fundamentos básicos de estadística*, Quito: Auto-edición, 2018.
- [10] E. R. Medrano, «Confiabilidad Mecánica de Fibras Ópticas Resistencia y Fatiga,» de *Simpósio Matéria 2000*, Rio de Janeiro, 2000.
- [11] R. Castilone, G. Glaesemann y T. Hanson, «EXTRINSIC STRENGTH MEASUREMENTS AND ASSOCIATED MECHANICAL RELIABILITY MODELING OF OPTICAL FIBER,» *National Fiber Optics Engineers Conference*, vol. 16, pp. 1-9, 2000.
- [12] G. Glaesemann, «OPTICAL FIBER FAILURE PROBABILITY PREDICTIONS FROM LONG-LENGTH STRENGTH DISTRIBUTIONS,» *Proceedings of the 40th International Wire and Cable Symposium*, pp. 819-825, 1991.
- [13] G. S. Glaesemann, P. Dainese, M. Edwards y J. Dhliwayo, *The Mechanical Reliability of Corning Optical Fiber in Small Bend Scenarios White Paper*, Corning, 2007.
- [14] C. Cheng y T. Chang, «Fracture mechanics evaluation of optical fibers,» *Materials Chemistry and Physics* , nº 77, pp. 110-116, 2002.

- [15] C. Chen, J. Lee y C. C.N., «Fracture mirror of optical fibers,» *Materials Chemistry and Physics*, vol. 82, pp. 698-704, 2003.
- [16] R. El-Abdi, R. Leite-Pinto, P. Lallinec y M. Poulain, «Mechanical Strength of Stripped Optical Fiber,» *Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2019. ICOMECYME 2019*, vol. 85, pp. 29-35, 2020.
- [17] M. Zhangwei, W. Zhifeng, L. Huanhuan, P. Fufei, C. Zhenyi y W. Tingyun, «Tensile strength and failure behavior of bare single mode fibers,» *Optical fiber Technology*, vol. 52, 2019.
- [18] B. Delobelle, B. Placet, D. Chapelle, F. Thiébaud, D. Perreux y R. Ferriere, «ANALYSIS OF THE FAILURE PROBABILITY OF AN OPTICAL FIBRE UNDER TENSILE LOADING,» 2008.
- [19] A. Hurtado de Mendoza-Lopez, Las fibras ópticas como testigos de agrietamiento en la mampostería de tabique, Ciudad de México: Tesis de Maestría, UNAM, 2019.
- [20] D. Hernandez-Reyes, Las fibras ópticas como testigo de daño estructural con aplicaciones potenciales en el monitoreo del antiguo templo de San Agustín, Ciudad de México: Tesis de Licenciatura, UNAM, 2020.
- [21] A. Hurtado de Mendoza-Lopez, S. Khotyaintsev, H. Guzman-Holguin, D. Hernandez-Reyes, J. Lopez-Mancera y M. Zuñiga-Bravo, «Application of fiber optic light guides with quartz core and cladding and plastic coating as indicators of the emergence of cracks in brickwork,» *Journal of Optical Technology*, vol. 87, nº 2, pp. 82-87, 2020.
- [22] ITU-T, MÉTODO DE MEDIDAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA TRACCIÓN EN CABLES DE FIBRA ÓPTICA SOMETIDAS A CARGA MECÁNICA, Ginebra: ITU, 1992.
- [23] M. Rodriguez y E. Castrillón, Manual de Evaluación Postsísmica de la Seguridad Estructural de Edificaciones, Ciudad de México: UNAM, 1995.
- [24] T. Michalske y S. Freiman, «A Molecular Interpretation of Stress Corrosion in Silica,» *Nature*, vol. 295, nº 2, pp. 511-512, 1982.

## Capítulo 5. Diseño del experimento, implementación de la instalación experimental y resultados

### 5.1.1 Experimentos para fibras de 6 y 12 metros de longitud de fibra SMF-28

Se realizaron pruebas en la instalación de la figura 5.1, se obtuvieron fuerzas de rotura y valores de elongación de la fibra óptica, siendo 50 pruebas con fibras 12 metros y 50 pruebas con fibras 6 metros de longitud de fibra SMF-28, con recubrimiento acrílico de claves AQUA SM-12, SLATE SM-5.

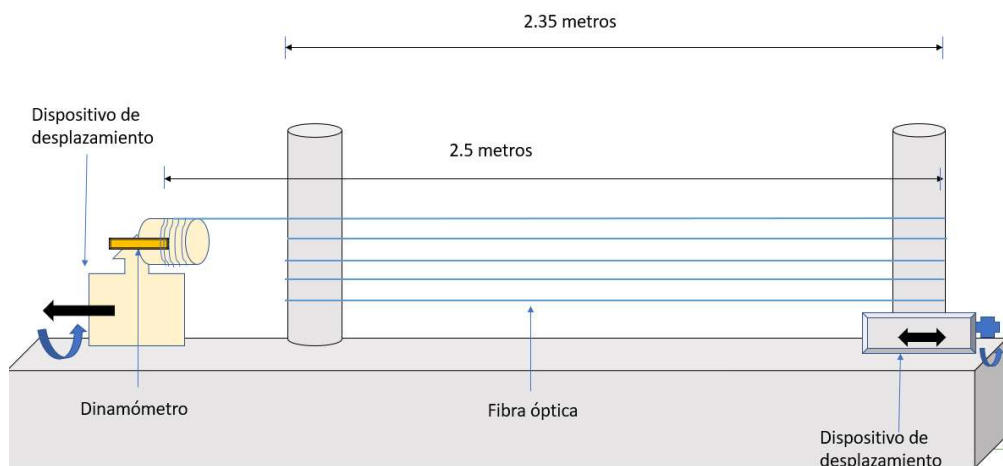


Figura 5.1 Esquemático de instalación de tracción (vista frontal)

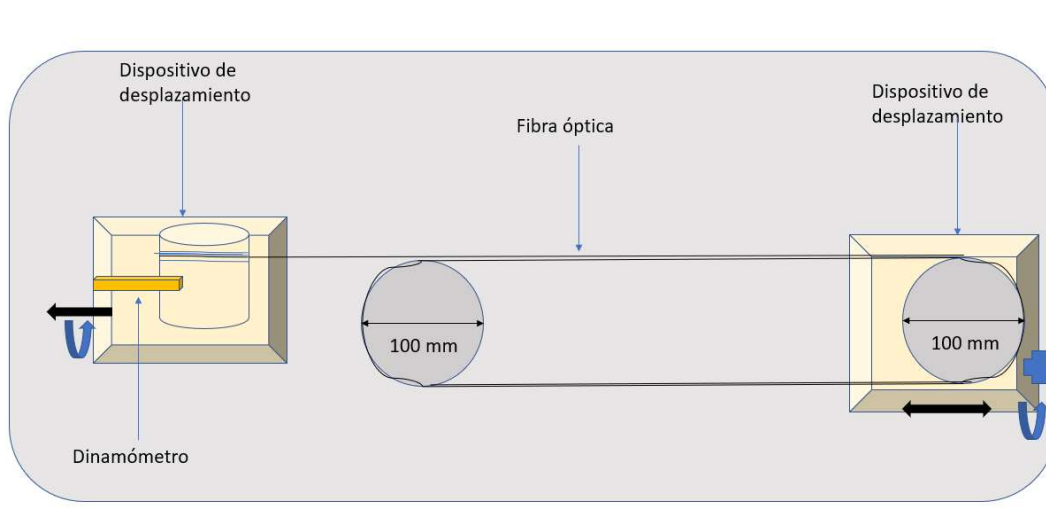


Figura 5.2 Esquemático de instalación de tracción (vista aérea)



Dependiendo de la longitud de esta el número de vueltas en los cilindros aumentaba, al ser de 5 vueltas para la longitud de 12 metros y de 3 para la longitud de 6 metros. Tenido en cada extremo dispositivos de desplazamiento para elongar la fibra óptica y a su vez un dinamómetro digital en [N] para registrar la fuerza de tensión en la fibra.

Las fibras fueron sujetas a una prueba de tracción dinámica aplicando una tasa (*rate*) constante de tensión aproximadamente de 1 mm/s, hasta alcanzar la rotura de la fibra.

### 5.1.2 Distribución de Weibull para experimentos

La distribución de Weibull es característica en el estudio de supervivencia de materiales [2], en caso particular de esta investigación es utilizarlo como modelo predictivo de rotura de fibras ópticas.

La distribución de probabilidad acumulada de Weibull ( $F_w$ ) está dada por la ecuación:

$$F_w = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (5-1)$$

Dónde:

- $\sigma$  el esfuerzo aplicado
- $\sigma_0$  el esfuerzo característico
- $m$  el módulo de Weibull

Mientras mayor sea el módulo de Weibull  $m$  menor será la dispersión de la probabilidad. Cabe decir que el esfuerzo característico  $\sigma_0$  de la función de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  puede ser reemplazado por otras variables de estudio como lo es el tiempo, el desplazamiento, la fuerza, etc.

La función de densidad de probabilidad de rotura de Weibull ( $F_{wd}$ ) es definida como:

$$F_{WD} = \left(\frac{m}{\sigma_0}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (5-2)$$

Al tener datos estadísticos de la fuerza de rotura en la fibra podemos utilizar la gráfica de Weibull para obtener los parámetros de esta, la cual relaciona la probabilidad de falla  $F$  con la fuerza registrada que la provocó, esto en escala logarítmica siguiendo el siguiente despeje.

$$F_w = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

$$1 - F_w = e^{\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right)}$$

$$-\ln(1 - F_w) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F_w}\right)\right) = m \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F_w}\right)\right) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0)$$

El siguiente paso es aproximar la probabilidad de falla, para esto los datos deben estar ordenados de menor a mayor. Existen diferentes formas de aproximarse la probabilidad de falla en la función de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  con datos estadísticos:

*“Calcular las posiciones de trazado de probabilidad  $F$ . Para la falla con el rango  $i$ , la posición de trazado del “punto medio” (porcentaje acumulativo de la muestra correspondiente fallada) es:  $F=100(i-0.5)/n$  [3]*

$$F = \frac{i-0.5}{n} \quad (5-3)$$

Donde:

- $F$  probabilidad de falla
- $i$  número de experimento
- $n$  número total de experimentos

La utilidad de esta fórmula en comparación con otras formas de obtener la aproximación a la probabilidad de falla es que añade un valor de fallo medio [3] en el ajuste lineal que se quiere realizar.

La distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  en escala logarítmica se forman de las siguientes ecuaciones:

$$\text{eje de ordenadas} = \text{Ln} \left( \text{Ln} \left( \frac{1}{1-F_w} \right) \right); \quad \text{eje de abscisas} = \text{Ln}(\sigma) \quad (5-4)$$

Por medio de un ajuste lineal se estima la ecuación lineal asociada a los datos, para con esto obtener los valores característicos de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$ .

Donde la ecuación lineal tiene la forma:

$$y = mx + b \cong \text{Ln} \left( \text{Ln} \left( \frac{1}{1-F_w} \right) \right) = m\text{Ln}(\sigma) - m\text{Ln}(\sigma_0)$$

Lo cual asemeja la ecuación característica de una recta con ordenada de origen, el módulo de Weibull queda como la pendiente de la recta  $m$ .

Utilizando las siguientes relaciones se pueden obtener los valores necesarios para graficar la distribución de probabilidad:

$$m = m; \quad \sigma_0 = e^{\frac{b}{m}} \quad (5 - 5)$$

Utilizando la ecuación (5-1) y (5-2) y los valores obtenidos de (5-5), se pueden obtener tanto las distribuciones de densidad de probabilidad  $F_{WD}$  y la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$ .

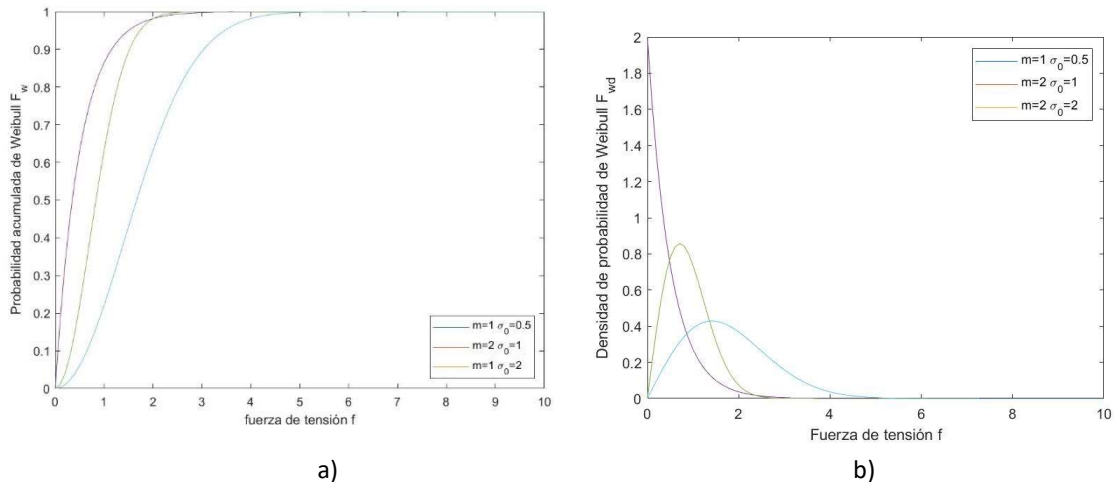


Figura 5.3 a) Ejemplos de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  y b) densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$

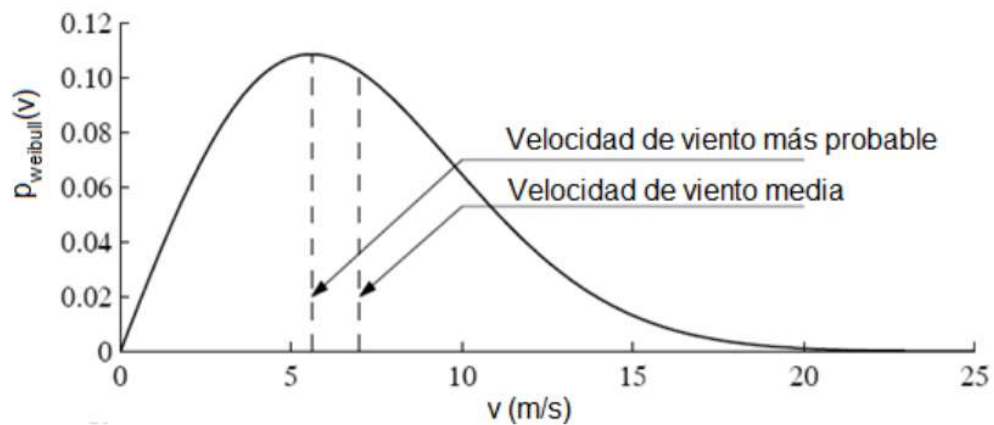


Figura 5.4 Ejemplo de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  aplicada en industria eólica [4]

Sin embargo, existen publicaciones que ponen en tela de juicio el uso de la distribución de Weibull para aproximar y dar tendencia a eventos de resistencia temporal o física, según Todinov [5] el uso de la distribución está encasillado a un tipo particular de evento donde se tenga una ley de potencia que pueda ajustar los experimentos siempre y cuando se tenga un mínimo de 30 elementos es imposible de diferenciar con algunas otras distribuciones de probabilidad como la Gaussiana o de Poisson.

Pese a esto, el uso de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  ha sido utilizada en diversas áreas de estudio para supervivencia de diversos materiales o tiempo de vida útil de elementos mecánicos y en diversas áreas de estudio que necesiten medir y estimar este tipo de parámetros.

Se puede decir que, para el estudio de supervivencia de la fibra óptica en esta investigación, la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  nos da una determinación única y crítica del material en la cual se puede confiar.

### 5.1.3 Variación de intervalos y reducción de rangos como validación de aproximación a distribución de probabilidad acumulada de Weibull $F_{WD}$

Como parte del proceso de comprobación de la probabilidad de falla  $F$  se propone el cambiar los intervalos de fuerza, al ser reducidos pueden provocar que los valores medios de cada intervalo sean más acertados al valor original y con esto verificar los parámetros característicos de la distribución que produce.

Para esto se propone tener mayor número de intervalos con 10 o más pruebas para realizar el ajuste lineal. Con la herramienta *histfit* de Matlab es posible incrementar el número de intervalos con el mismo número de pruebas.

Y de igual forma, con lo valores medios de cada intervalo obtener los parámetros característicos de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  conforme al número de intervalos.

La segunda parte de esta comprobación es eliminar muestras del experimento con el objetivo de reducir el rango y conocer que tanto afecta esta dispersión de datos en el ajuste lineal que se realiza.

5.2 Distribuciones de probabilidad acumulada de Weibull  $F_{WD}$  para fibra SMF 28 cortas (0.3 m)

En etapas anteriores del proyecto se sometió a pruebas de tracción a la fibra SMF-28(30 cm de longitud), se realizaron 20 pruebas con esta fibra en modo de tracción directa su rotura, a continuación, se presentan los resultados de estas pruebas con valores estadísticos obtenidos.

**Tabla 5.1 Fuerza de rotura en fibra SMF-28 (30 cm de longitud) [1]**

# de experimento	Fuerza de rotura $f$ [N]
1	75.713
2	75.713
3	80.1673
4	84.621
5	84.621
6	84.621
7	84.621
8	86.8447
9	86.8447
10	89.0748
11	89.0748
12	89.0748
13	89.0748
14	89.0748
15	91.3016
16	93.52
17	93.5285
18	97.9822
19	97.9822
20	102.43

Los valores estadísticos del experimento son los siguientes:

- Media aritmética  $\mu=88.2942$  [N]
- Varianza  $S^2=44.7562$  [N<sup>2</sup>]
- Desviación estándar  $S=6.69$  [N]
- Rango  $R= 26.7164$  [N]

Relacionando los valores se obtuvo un histograma con curva de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$ .

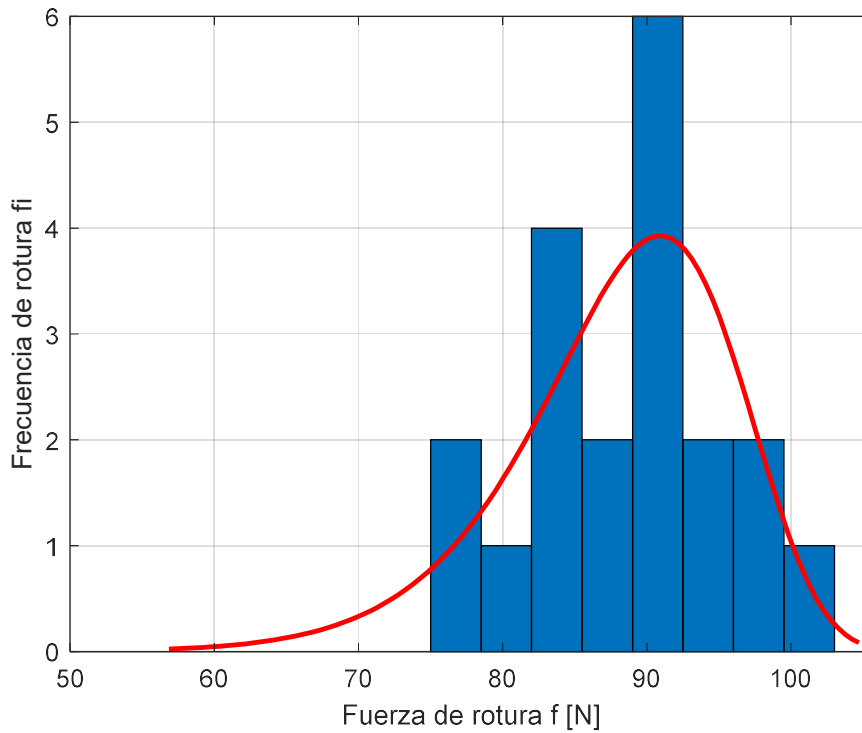


Figura 5.5 Frecuencia de rotura  $f_i$  vs. fuerza de tensión  $f$ , con densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$

Con los datos estadísticos obtenidos se hizo el ajuste a la probabilidad de falla de Weibull  $F_w$ .

De la tabla 5.1, se obtuvieron el número de experimento y la fuerza de rotura, mediante el uso de las ecuaciones (5-3) y (5-4) se completó la tabla 5.2 para realizar las distribuciones de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  en escala logarítmica.

**Tabla 5.2 Probabilidad de falla  $F$  vs fuerza de rotura  $f$  para distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  basados en ec. 5-3**

# de experimento i	$f$	F	$\text{Ln}(f)$	$\text{Ln}(\text{Ln}(1/1-F))$
1	75.71	0.025	4.326949876	-3.676247
2	75.71	0.075	4.326949876	-2.55154
3	80.17	0.125	4.384115701	-2.013419
4	84.62	0.175	4.438182463	-1.648325
5	84.62	0.225	4.438182463	-1.366914
6	84.62	0.275	4.438182463	-1.134498
7	84.62	0.325	4.438182463	-0.933837
8	86.84	0.375	4.464121466	-0.755015
9	86.84	0.425	4.464121466	-0.591701
10	89.07	0.475	4.489476466	-0.439502
11	89.07	0.525	4.489476466	-0.295122
12	89.07	0.575	4.489476466	-0.155875
13	89.07	0.625	4.489476466	-0.019357
14	89.07	0.675	4.489476466	0.1168316
15	91.30	0.725	4.514168312	0.2554049
16	93.52	0.775	4.538175317	0.3998862
17	93.53	0.825	4.538266203	0.5555902
18	97.98	0.875	4.58478583	0.7320994
19	97.98	0.925	4.58478583	0.951761
20	102.43	0.975	4.629179638	1.3053227



Al graficar las columnas  $\text{Ln}(f)$  y  $\text{Ln}(\text{Ln}(1/1-F))$ , se obtuvo la siguiente gráfica probabilidad de falla  $F$  vs fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica de la cual se obtuvo el ajuste lineal.

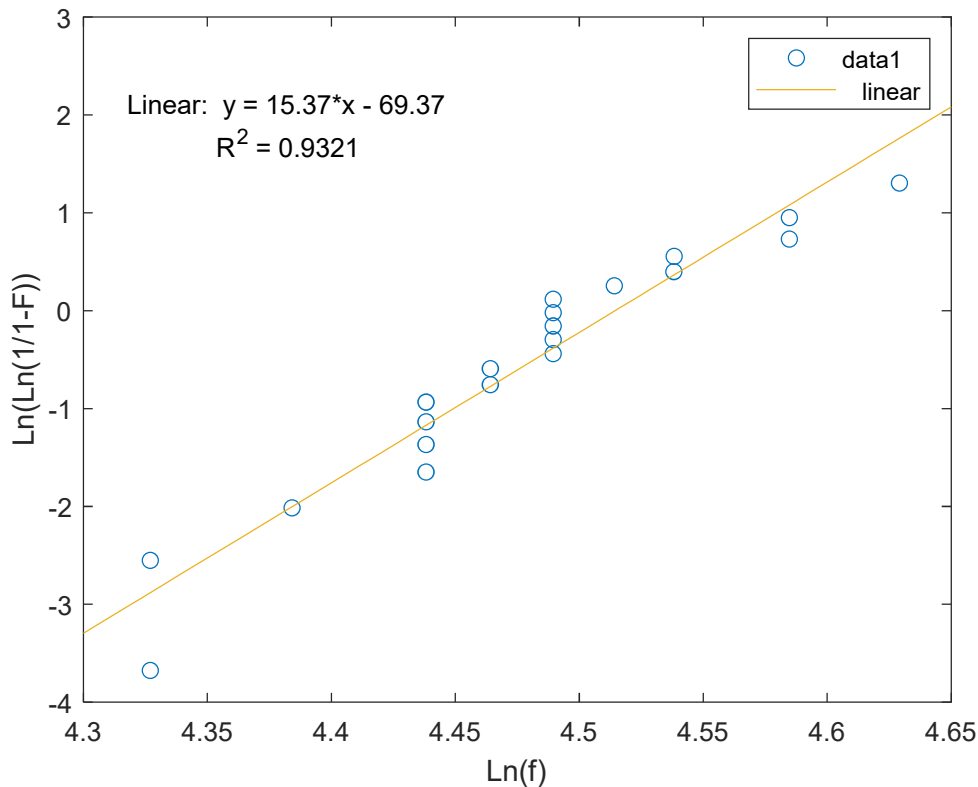


Figura 5.6 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal

La ecuación lineal ajustada a los puntos es:

$$y = 15.37 * x - 69.37$$

$$m = 15.37; \sigma_0 = e^{\frac{69.37}{15.37}} = 91.22 [N]$$

Mediante estos datos es posible graficar la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  ajustada a la fuerza de rotura para la fibra SMF28, utilizando las ecuaciones (5-1) y (5-2).

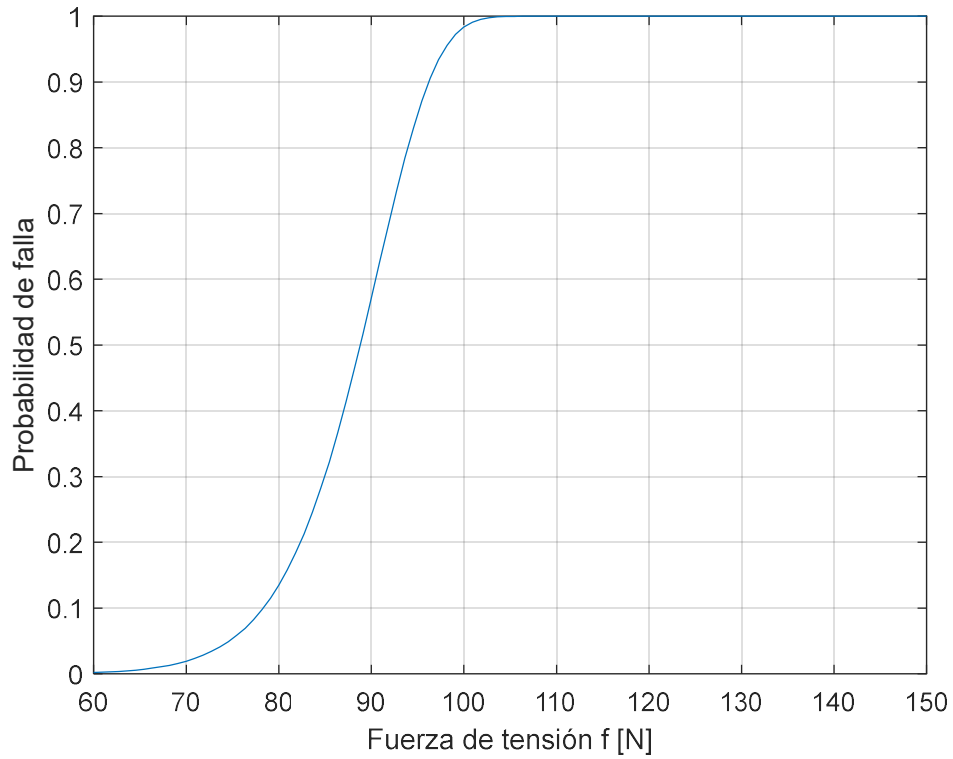


Figura 5.7 Distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  vs. Fuerza de tensión  $f$  para fibra SMF 28

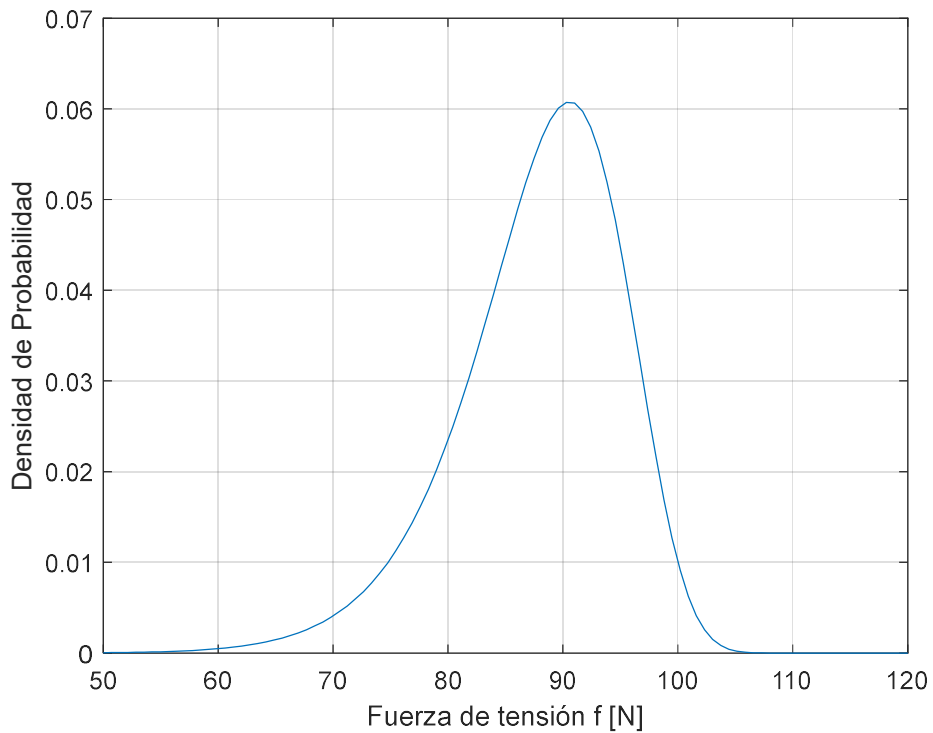


Figura 5.8 Densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  vs. Fuerza de tensión  $f$  para fibra SMF 28 de 0.3 m de longitud

### 5.3 Análisis estadístico de resultados de fibra SMF 28 con 30 cm de longitud

Para verificar tal información se realizó una primera etapa de comprobación, en la cual se incrementaba el número de intervalos, siendo 8 el intervalo original y 18 el último intervalo, para el ajuste antes realizado, dando como resultado las siguientes figuras:

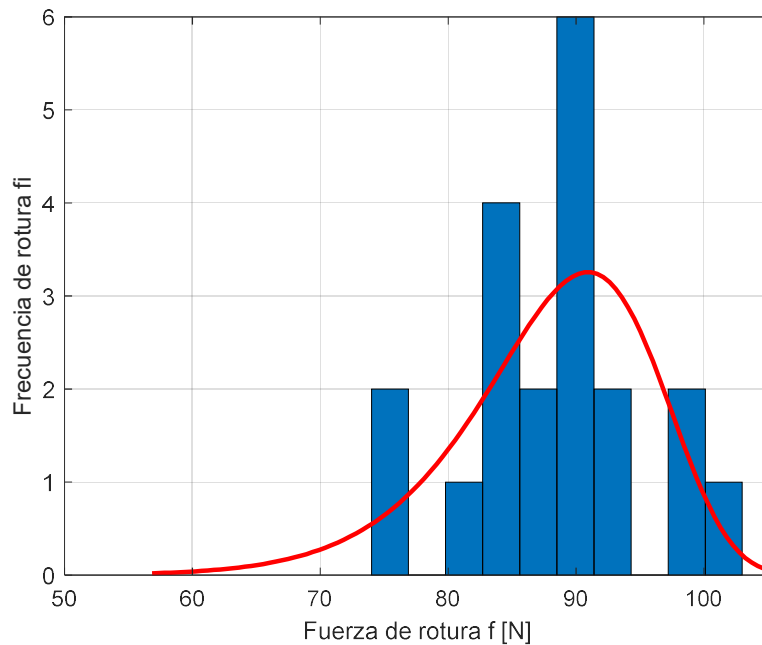


Figura 5.9 Frecuencia de rotura  $f_i$  vs. fuerza de tensión  $f$  para 10 intervalos de fuerza con fibra SMF-28

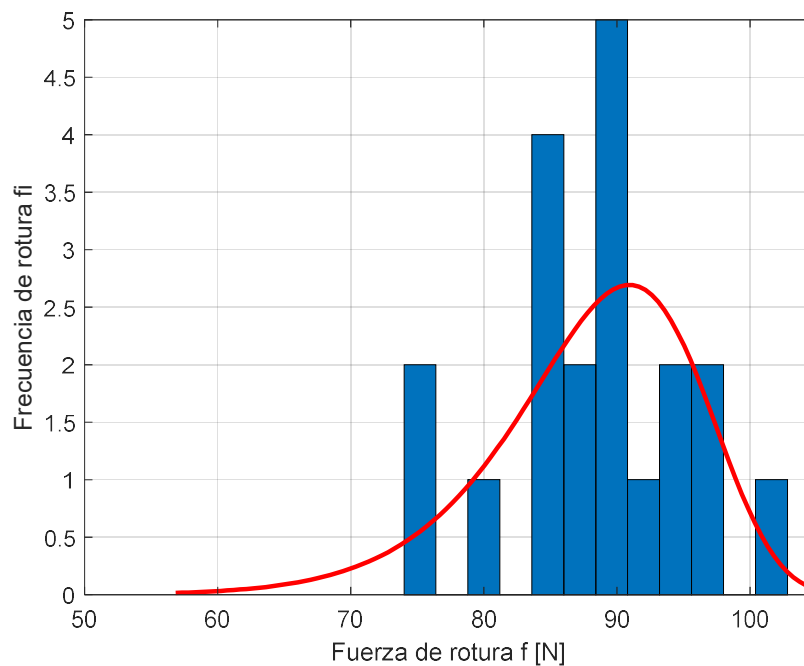


Figura 5.10 Frecuencia de rotura  $f_i$  vs. fuerza de tensión  $f$  para 12 intervalos de valor fuerza con fibra SMF-28

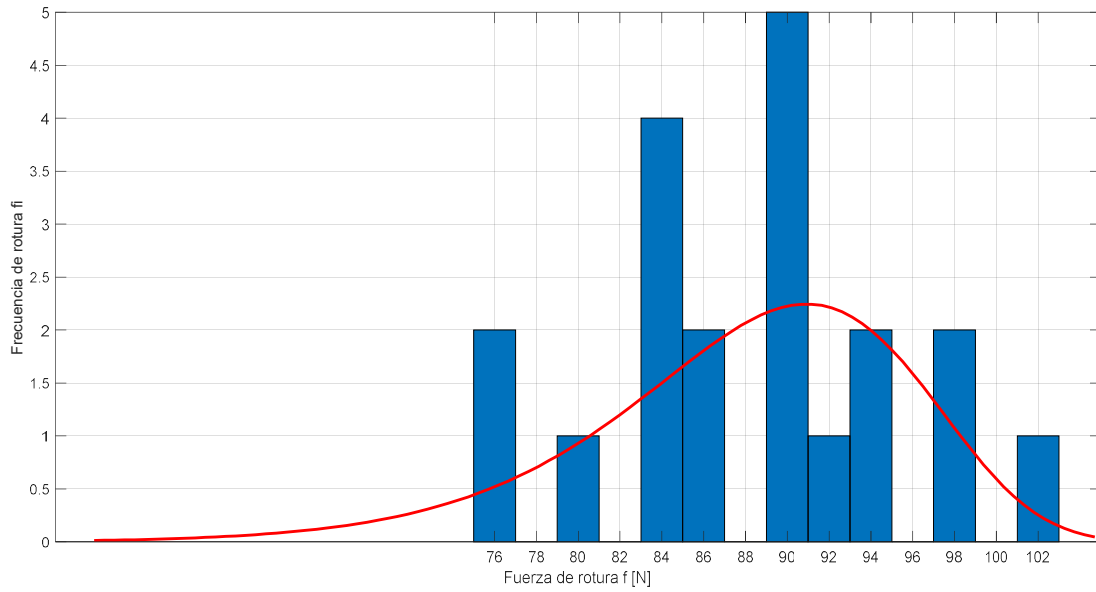


Figura 5.11 Frecuencia de rotura  $f_i$  vs. fuerza de tensión  $f$  para 14 intervalos de fuerza con fibra SMF-28

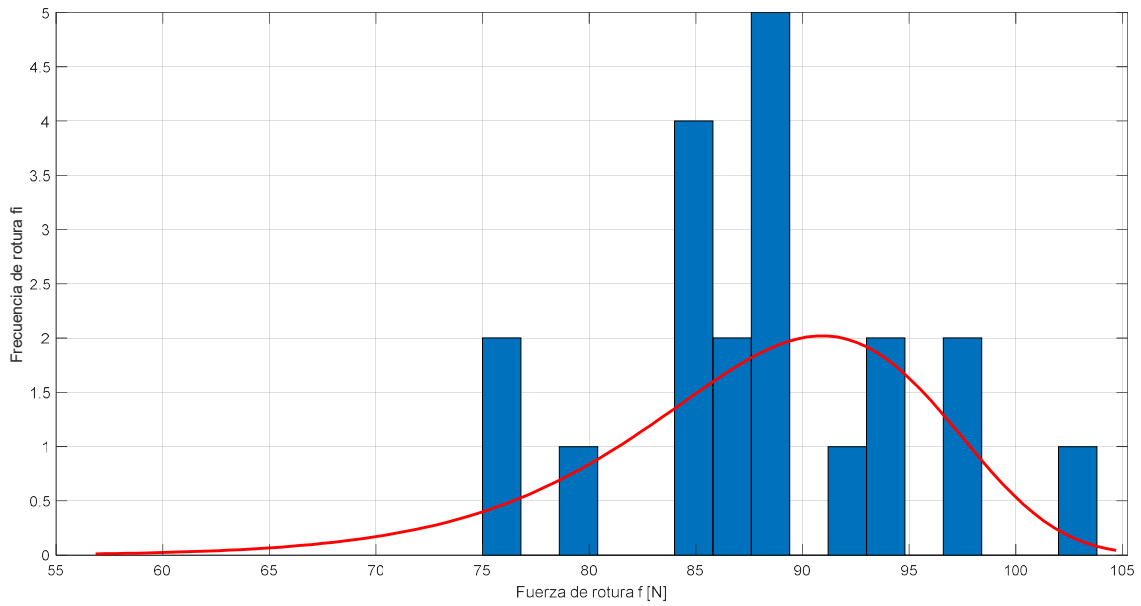


Figura 5.12 Frecuencia de rotura  $f_i$  vs. fuerza de tensión  $f$  para 16 intervalos de fuerza con fibra SMF-28

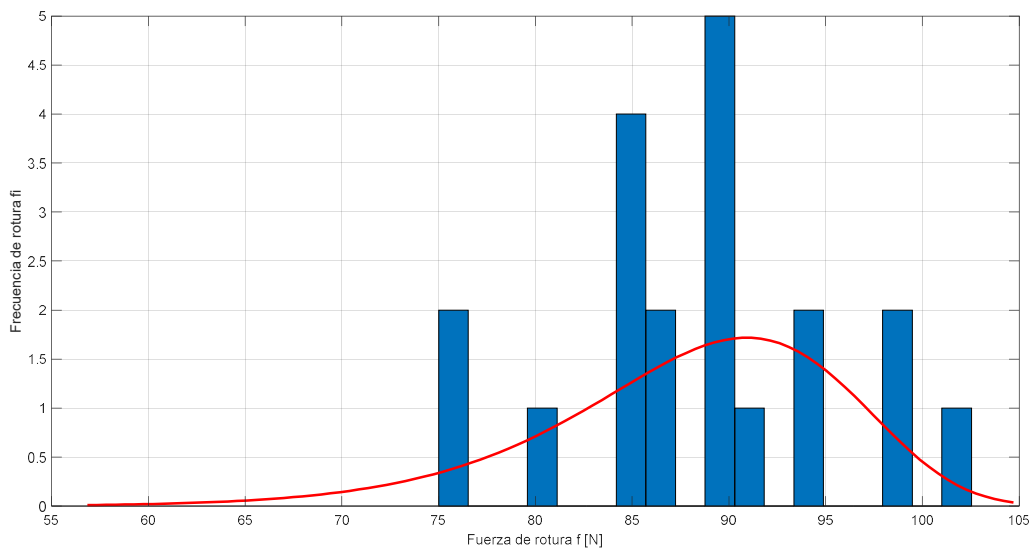


Figura 5.13 Frecuencia de rotura  $f_i$  vs. fuerza de tensión  $f$  para 18 intervalos de fuerza con fibra SMF-28

De los histogramas realizados se tomó el valor medio de cada intervalo y la frecuencia con que se repetía para realizar las siguientes figuras. En estas figuras, están adjuntos los valores calculados de  $m$  y  $\sigma_0$  para su distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  correspondiente.

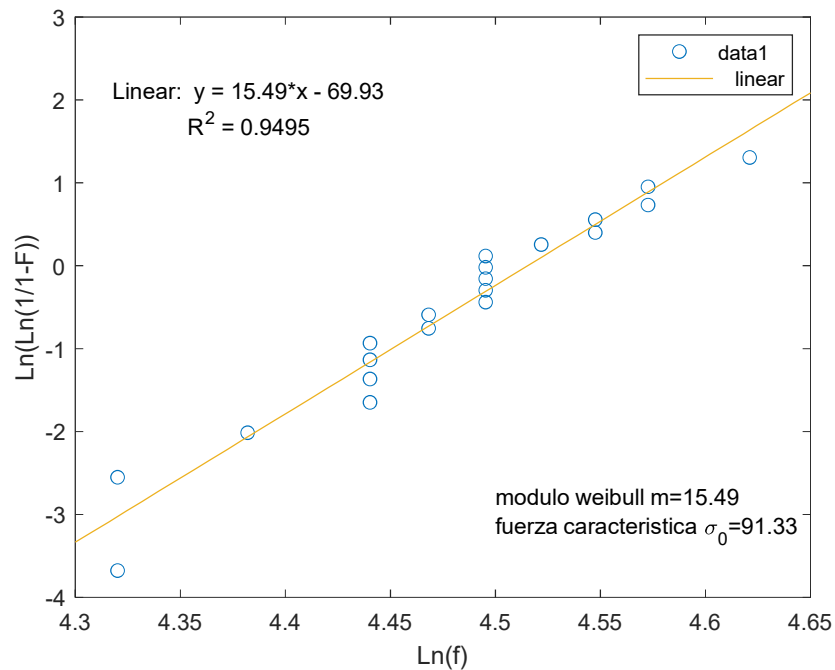


Figura 5.14 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal para 10 intervalos de fuerza

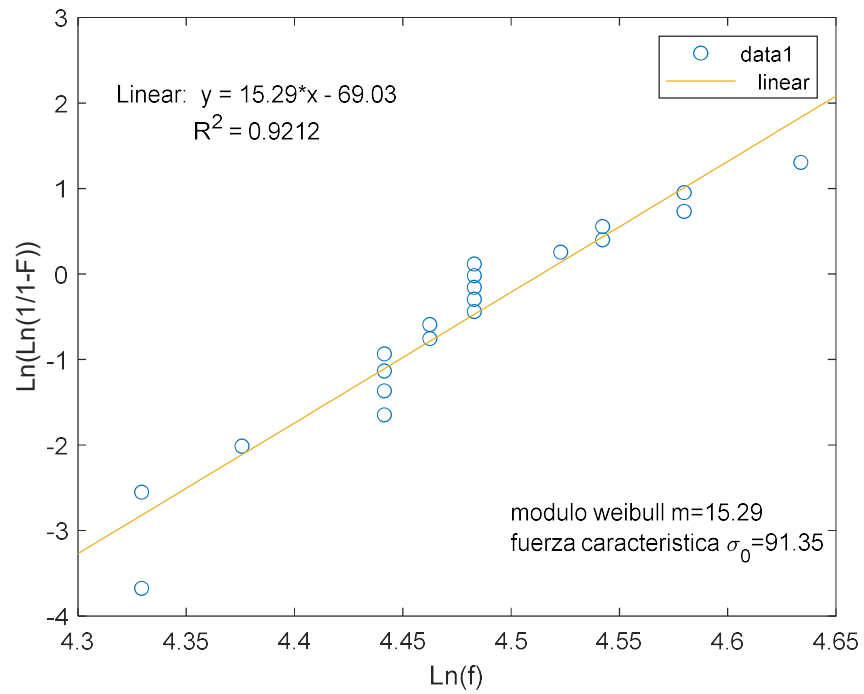


Figura 5.15 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal para 12 intervalos de fuerza

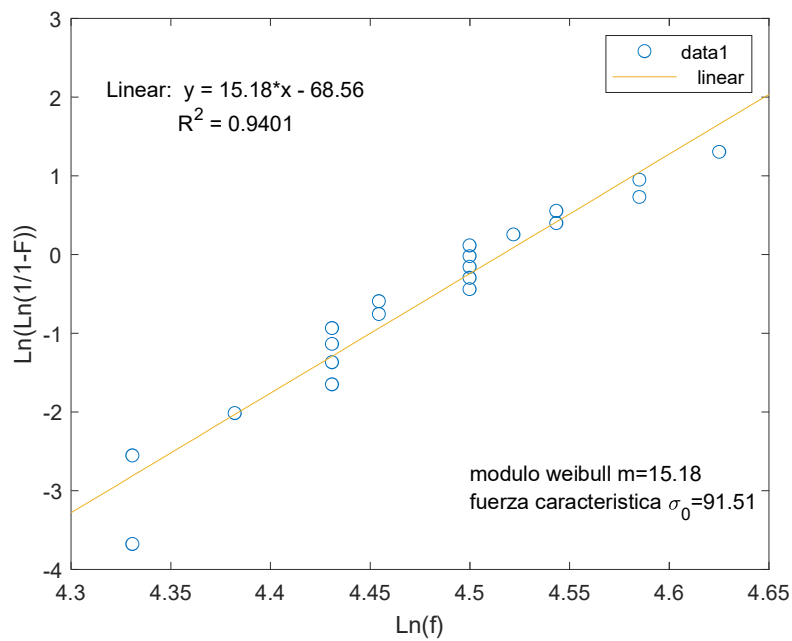


Figura 5.16 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal para 14 intervalos de fuerza

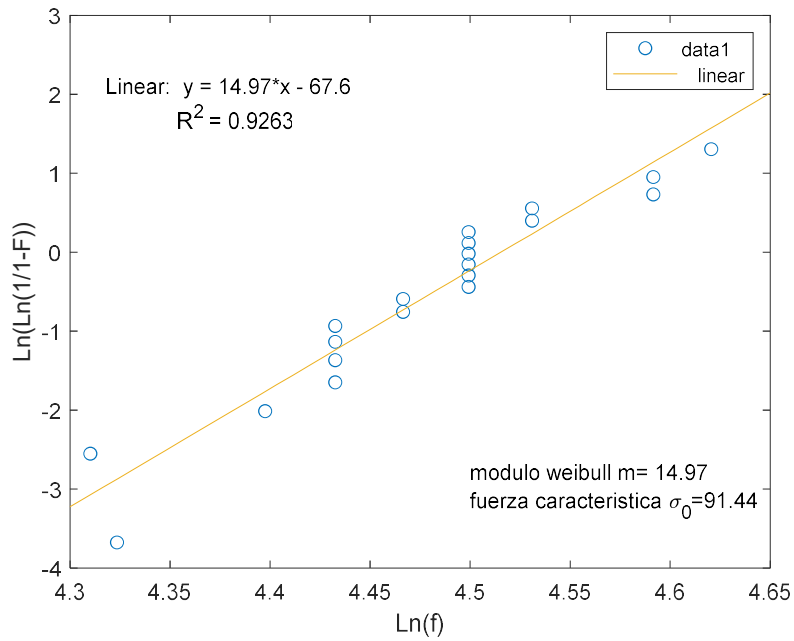


Figura 5.17 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal para 16 intervalos de fuerza

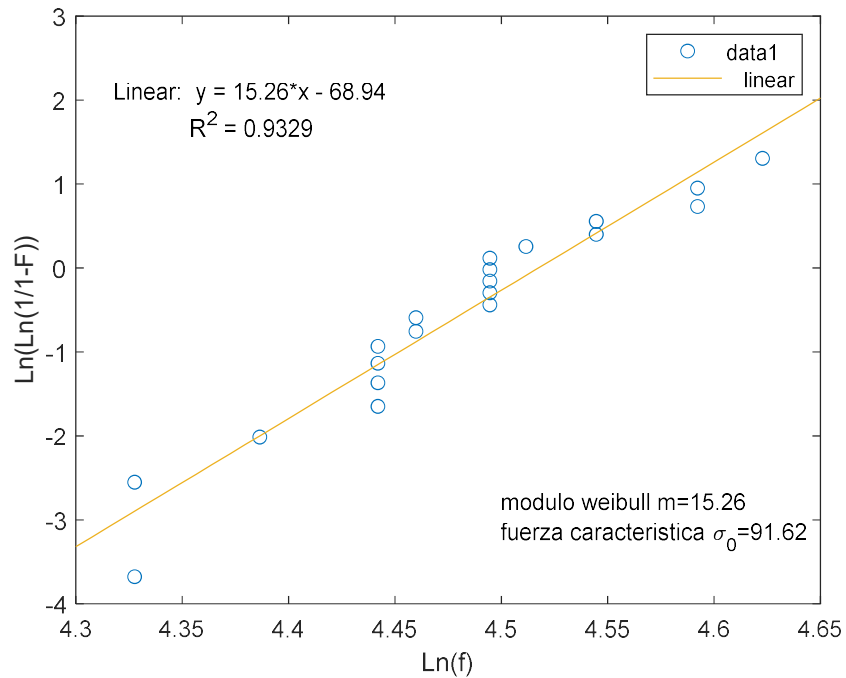


Figura 5.18 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal para 18 intervalos de fuerza

En la tabla 5.3 se juntan los valores característicos de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  para cada intervalo.

**Tabla 5.3 Valores característicos de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  para diferentes intervalos de fuerza**

Intervalos	Módulo de Weibull $m$	Fuerza característica $\sigma_0$ [N]	Correlación $R^2$
8 (original)	15.37	91.22	0.9321
10	14.97	91.44	0.9263
12	15.49	91.33	0.9495
14	15.18	91.55	0.9401
16	15.29	91.35	0.9212
18	15.26	91.62	0.9329

La mejor correlación entre los datos ajustados es con 12 intervalos en el histograma, a pesar de esto entre los valores característicos de diversos intervalos no se tiene una gran diferencia con los valores originales, están en un rango corto de menos de 1 unidad para el módulo de Weibull y 0.40 [N] para el valor característico  $\sigma_0$  de fuerza.

Los valores estadísticos de los datos y los valores característicos de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  se muestran a continuación

- Media  $\mu$ : 88.056
- Varianza  $S^2$ : 59.9185
- Rango R: 26.7170
- Mediana: 89.0748
- Desviación estándar S: 7.7407



**Tabla 5.4 Valores característicos de distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  para fibra SMF 28**

Intervalos	Módulo de Weibull $m$	Fuerza característica $\sigma_0$ [N]	Correlación $R^2$
8	15.37	91.22	0.9321
10	14.97	91.44	0.9263
12	15.49	91.33	0.9495
14	15.18	91.55	0.9401
16	15.29	91.35	0.9212
18	15.26	91.62	0.9329
Ajuste Matlab (6)	13.91	91.41	-----

Con los valores de la tabla 5.4 se graficaron las distribuciones de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  y la distribución de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{wD}$ .

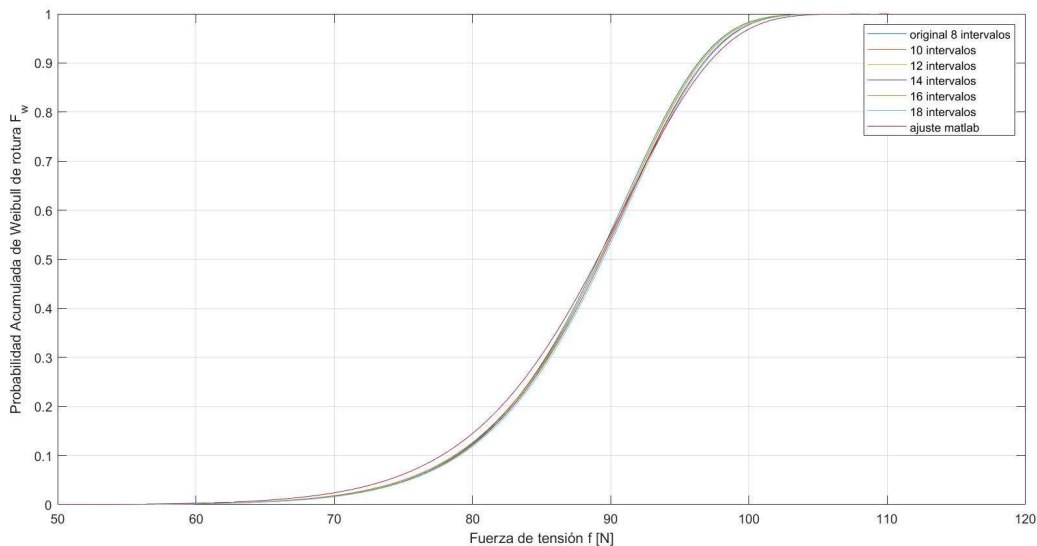


Figura 5.19 Probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  de rotura para diferentes intervalos de fuerza

Además, se compararon las distribuciones de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{wD}$  con intervalos de fuerza mayores con la distribución de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{wD}$  con intervalos de fuerza original (8 intervalos).

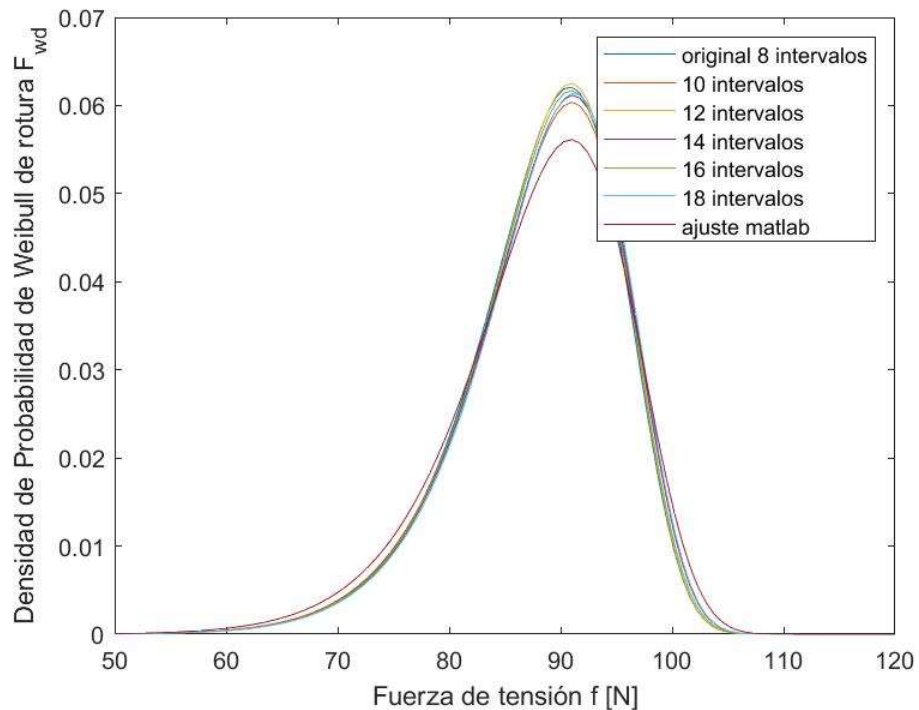


Figura 5.20 Distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_w$  para intervalos diferentes de histogramas

De manera gráfica se puede observar que obtenido de *histfit* da un menor módulo de Weibull  $m$  que se ve reflejado en un pico de densidad menor a los obtenidos al tener mayor número de intervalos de fuerza. A pesar de esto, mantiene la forma de la distribución de probabilidad acumulada  $F_w$ , la distribución de densidad de probabilidad  $F_{WD}$  y los parámetros de ambas funciones son semejantes entre sí.

#### 5.4 Reducción de rango para fibra smf-28 de 30 cm de longitud

Como se planteó en la sección 5.2, se realizó una segunda etapa de evaluación por medio de reducción del rango de la fuerza de rotura  $f$ . Esta etapa se divide en tres reducciones, teniendo un mínimo de 10 muestras de la experimentación para realizar los ajustes a la probabilidad de Weibull.

La primera reducción de fuerza fue omitiendo 3 muestras que estaban por debajo de 80 N, lo cual nos dio la figura 5.21 formado con *Distribution fitter*.

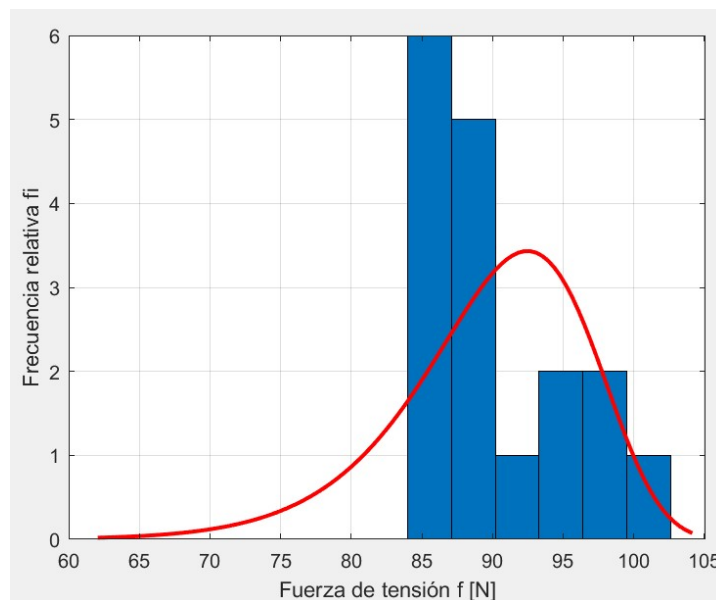


Figura 5.21 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. la fuerza de tensión  $f$  para el rango reducido de fuerza de rotura correspondiente a 17 muestras, obtenida con *histfit*

Los valores estadísticos fueron los siguientes:

- Media  $\mu$ : 89.8824 [N]
- Varianza  $S^2$ : 45.4809 [N<sup>2</sup>]
- Desviación estándar  $S$ : 6.7439 [N]
- Mediana: 89.0748 [N]
- Rango  $R$ : 17.8090 [N]

La segunda reducción de fuerza fue omitiendo valores menores a 85 N, quedando 13 muestras.

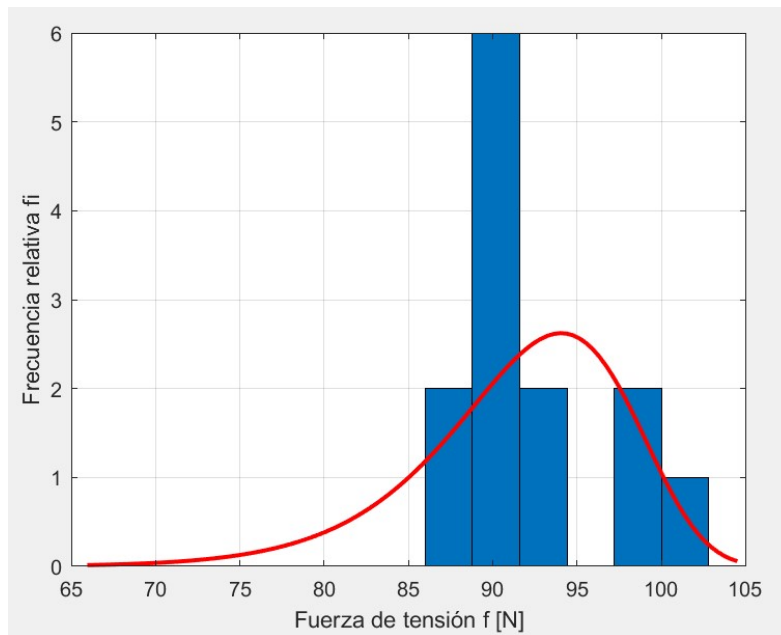


Figura 5.22 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. la fuerza de tensión  $f$  para el renglo reducido de fuerza de rotura correspondiente a 13 muestras, obtenida con histfit

Los valores estadísticos fueron los siguientes:

- Media  $\mu$ : 91.6522 [N]
- Varianza  $S^2$ : 37.6981 [N<sup>2</sup>]
- Desviación estándar  $S$ : 6.1398 [N]
- Mediana: 89.0748 [N]
- Rango  $R$ : 15.5853 [N]

La última reducción de fuerza fue excluyendo fuerzas de rotura  $f$  menores a 89 N, esto para tener por lo menos 10 muestras y realizar el ajuste.

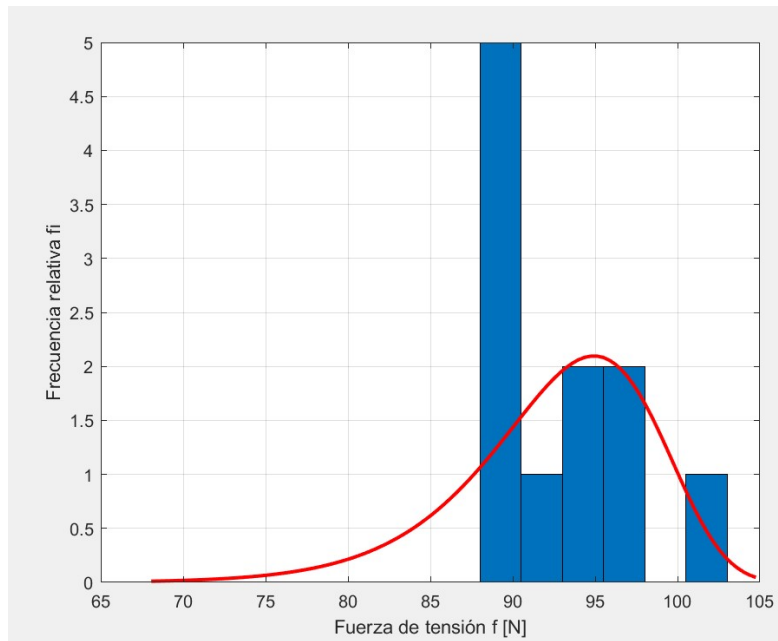


Figura 5.23 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. la fuerza de tensión  $f$  para el renglo reducido de fuerza de rotura correspondiente a 11 muestras, obtenida con histfit

Los valores estadísticos fueron:

- Media  $\mu$ : 92.6232 [N]
- Varianza  $S^2$ : 33.927 [N<sup>2</sup>]
- Desviación estándar  $S$ : 6.1398 [N]
- Mediana: 91.3016 [N]
- Rango  $R$ : 15.3552 [N]

**Tabla 5.5 Parámetros de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  asociada a rangos reducidos**

# de muestras	Rango [N]	Módulo de Weibull $m$	Fuerza característica $\sigma_0$ [N]
20 (Original)	27.1	15.37	91.22
17	17.80	16.4	92.82
13	15.58	18.45	94.34
11	13.35	19.7	95.18

Graficando estos valores dio la figura 5.24, se obtuvo la distribución densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  para las 4 distribuciones de la tabla 5.5 y en la figura 5.25 para la probabilidad acumulada de cada rango de fuerza de rotura.

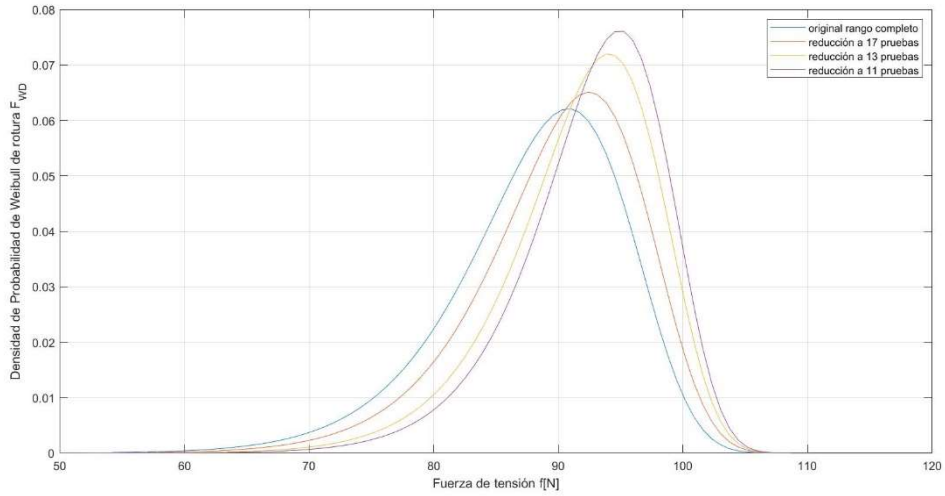


Figura 5.24 Densidad de probabilidad de Weibull de rotura  $F_{WD}$  vs fuerza de tensión  $f$  para diversos rangos de fuerza de rotura

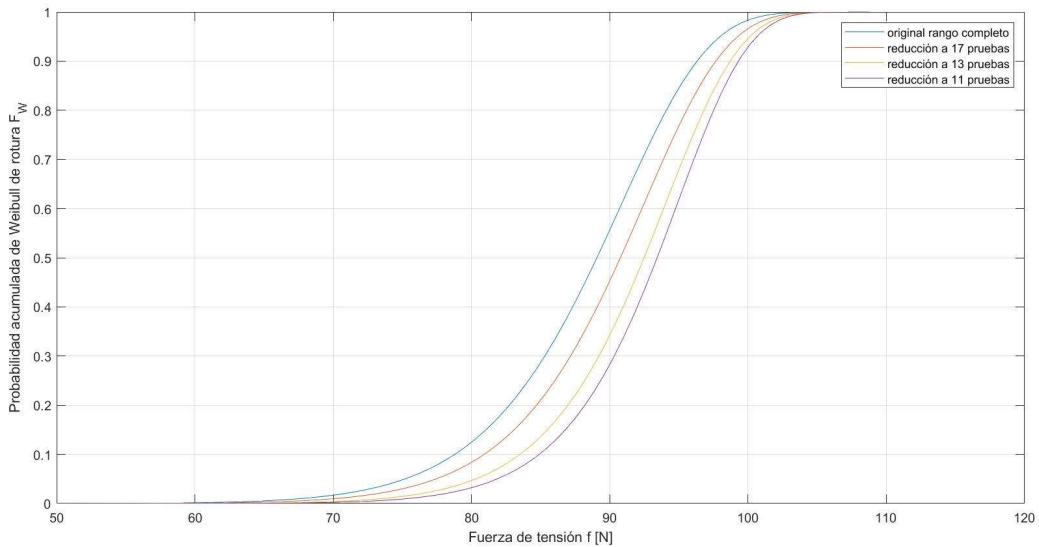


Figura 5.25 Probabilidad acumulada de Weibull de rotura  $F_W$  vs. Fuerza de tensión  $f$  para diversos rangos de fuerza de rotura

5.5 Resultados de experimentación fibra largas (12 y 6 metros de longitud)

**Tabla 5.6 Elongación  $e$  y fuerza de rotura  $f$  en fibra SMF 28 de 12 metros de longitud provocada por tensión**

# de prueba	Elongación $e$ [%]	Fuerza de rotura $f$ [N]
1	0.448	26.6
2	1.4	28
3	1.4	28.4
4	1.43	31.8
5	1.452	34.4
6	1.5875	35.3
7	1.7	36.8
8	1.77	39.8
9	1.88	41
10	1.884	41.8
11	1.92	45.2
12	2	46
13	2.03	46.4
14	2.0375	47
15	2.064	47.2
16	2.075	47.4
17	2.11	47.8
18	2.11	47.8
19	2.11	48
20	2.15	48.4
21	2.15	49.6
22	2.18	49.6
23	2.18	49.6
24	2.1875	49.8
25	2.1875	50.4
26	2.22	51.2
27	2.26	52.2
28	2.3	54.6
29	2.3375	55
30	2.3375	56
31	2.3375	56.4
32	2.3375	57
33	2.3375	57.2
34	2.375	57.2
35	2.375	57.4
36	2.375	57.6
37	2.375	58

38	2.4125	58.4
39	2.4125	58.4
40	2.4125	58.6
41	2.4125	58.8
42	2.4125	58.8
43	2.4125	58.8
44	2.4125	59
45	2.45	59.2
46	2.45	59.8
47	2.45	60
48	2.45	60
49	2.45	60
50	2.45	60.6

De estas pruebas se obtuvo la tabla 5.6, la cual contiene las variables de estudio: elongación máxima antes de la rotura y fuerza de rotura de la fibra óptica en los 50 ensayos realizados.

Los valores estadísticos fueron los siguientes:

Elongación  $e$ :

- Varianza  $S^2$ : 0.1538 [%<sup>2</sup>]
- Media  $\mu$ : 2.134 [%]
- Rango R: 2.0395 [%]
- Desviación estándar S: 0.3922[%]
- Mediana: 2.24 [%]

Fuerza de rotura  $f$ :

- Varianza  $S^2$ : 93.725 [N<sup>2</sup>]
- Media  $\mu$ : 50.45 [N]
- Rango R: 34.8 [N]
- Desviación estándar S: 9.6812 [N]
- Mediana: 51.7 [N]

Se realizaron los graficas de frecuencia de rotura  $f_i$  para fuerza de rotura  $f$  y elongación  $e$ , y se superpusieron las distribuciones de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  asociadas a los datos representados en los histogramas.



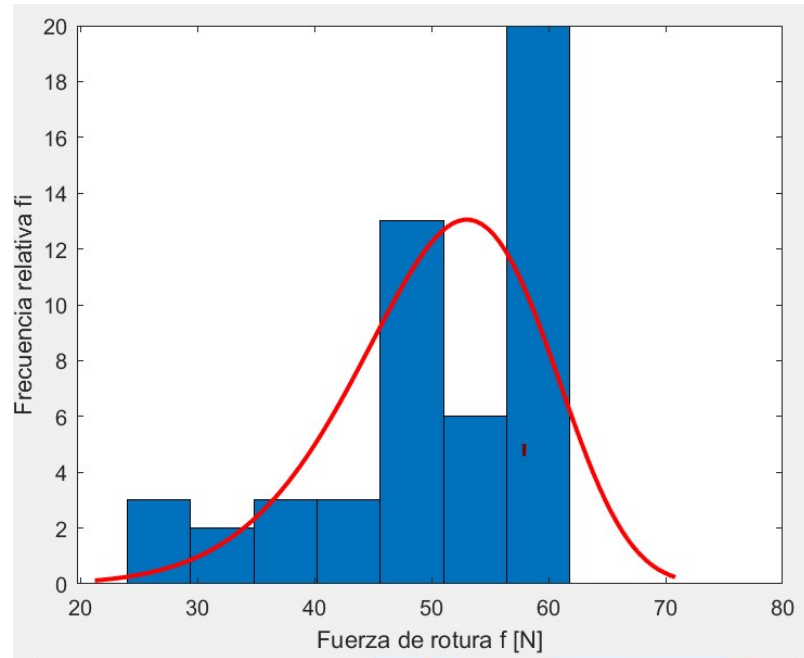


Figura 5.26 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. la fuerza de tensión  $f$  fibra SMF 28 con longitud de 12 metros

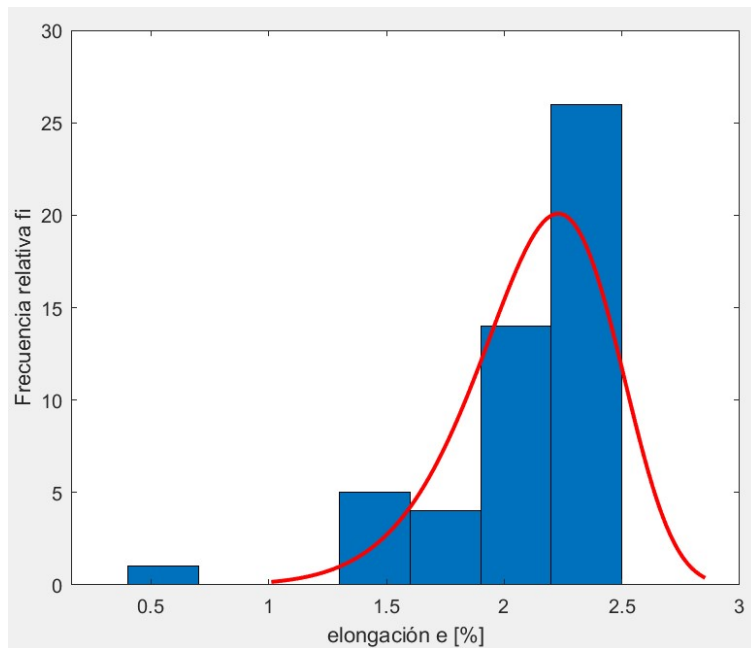


Figura 5.27 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. elongación  $e$  para fibra SMF 28 con longitud de 12 metro

Con los datos obtenidos se realizaron gráficas de probabilidad de falla  $F$  vs fuerza de rotura  $f$  en forma logarítmica de la cual se obtuvo el ajuste lineal, como paso para calcular los parámetros característicos de la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  asociada a los datos.

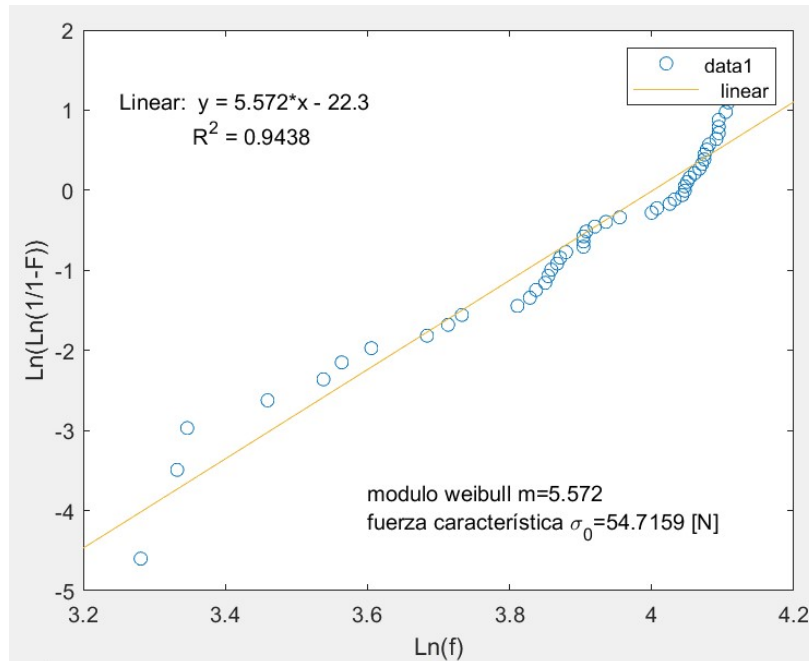


Figura 5.28 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal (12 m de longitud)

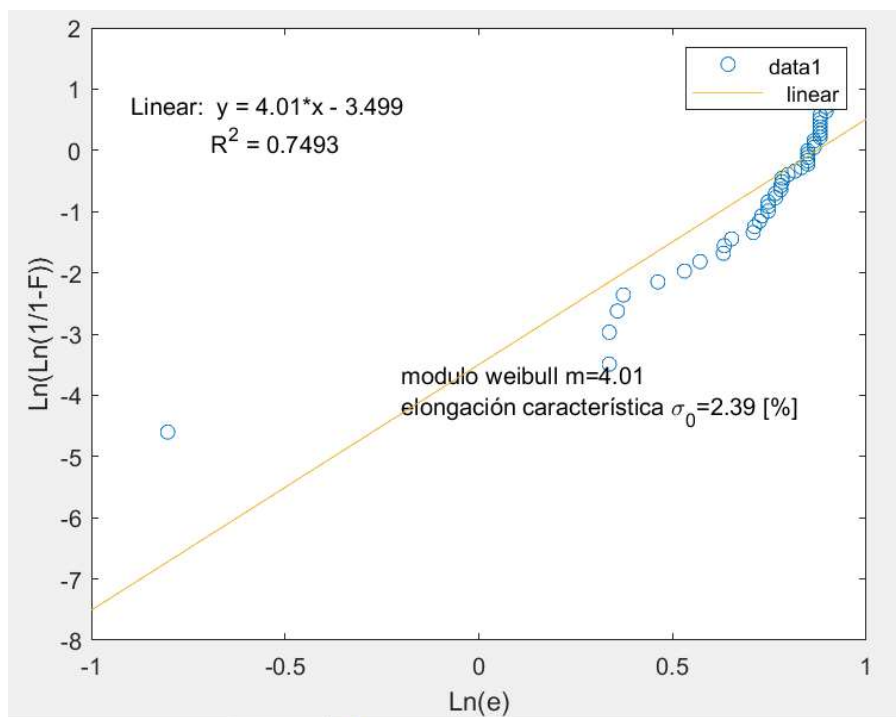


Figura 5.29 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. elongación  $e$  en escala logarítmica con ajuste lineal (12 m de longitud)

Con los valores característicos de fuerza de rotura  $f$  y elongación  $e$  se obtuvieron las gráficas de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$ .

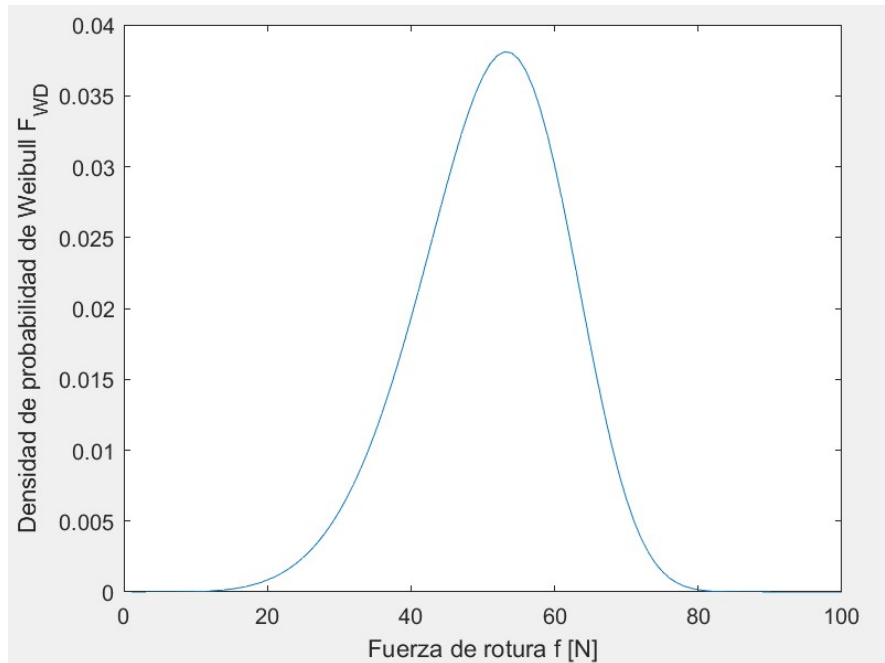


Figura 5.30 Densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  vs fuerza de rotura  $f$  de fibra SMF 28 (12 m de longitud)

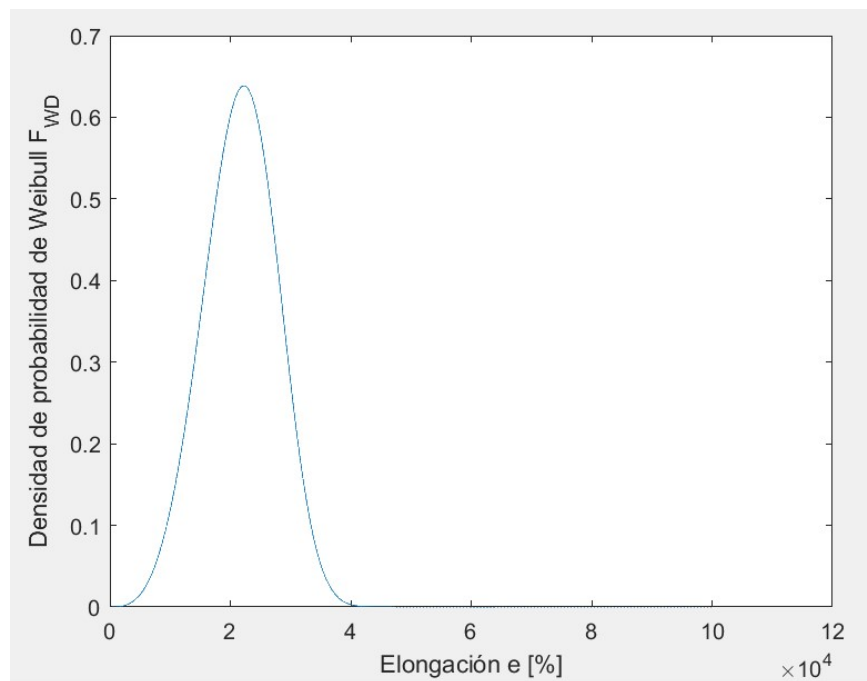


Figura 5.31 Densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  vs elongación  $e$  de fibra SMF 28 (12 m de longitud)

**Tabla 5.7 5.6 Elongación  $e$  y fuerza de rotura  $f$  en fibra SMF 28 de 6 metros de longitud provocada por tensión**

# de prueba	% de elongación	Fuerza de rotura
1	2.14	33.6
2	2.65	36.2
3	2.72	36.6
4	2.92	41
5	2.93	42.2
6	2.97	42.2
7	3	46.0
8	3.04	46.2
9	3.34	47.2
10	3.34	47.6
11	3.48	48.0
12	3.6	48.2
13	3.62	48.4
14	3.62	48.4
15	3.62	49.4
16	3.62	49.4
17	3.68	49.6
18	3.69	49.8
19	3.69	49.8
20	3.69	50.0
21	3.69	50.0
22	3.75	50.4
23	3.76	50.8
24	3.76	50.8
25	3.76	50.8
26	3.76	51.2
27	3.76	51.4
28	3.76	51.4
29	3.81	52.2
30	3.81	54.1
31	3.83	57.6
32	3.83	58.0
33	3.83	58.0
34	3.83	58.2
35	3.87	58.2
36	3.88	58.4
37	3.88	58.8
38	3.88	58.8
39	3.88	58.8
40	3.88	59.0
41	3.9	59.4
42	3.9	59.4
43	3.94	59.4

44	3.94	60.0
45	3.94	60.2
46	3.94	60.2
47	4.007	61.2
48	4.007	61.8
49	4.007142857	62.4
50	4.07	65

Los valores estadísticos fueron los siguientes:

Elongación:

- Varianza  $S^2$ : 0.1715[%<sup>2</sup>]
- Media  $\mu$ : 3.6293 [%]
- Rango R: 1.9314 [%]
- Desviación estándar S: 0.4142%
- Mediana: 3.76 [%]

Fuerza de rotura:

- Varianza  $S^2$ : 52.6751 [N<sup>2</sup>]
- Media  $\mu$ : 52.314 [N]
- Rango R: 31.4 [N]
- Desviación estándar S: 7.2578 [N]
- Mediana: 51 [N]

Se realizaron graficas de frecuencia de rotura  $f_i$  para fuerza de rotura  $f$  y elongación  $e$ , y se superpusieron las distribuciones de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  asociadas a los datos representados en los histogramas.

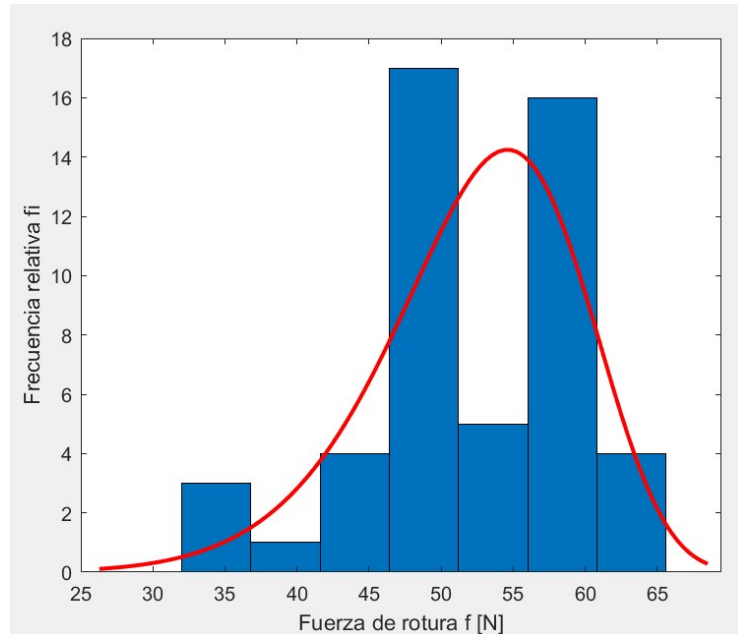


Figura 5.32 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. la fuerza de tensión  $f$  para fibra SMF 28 (6 metros de longitud)

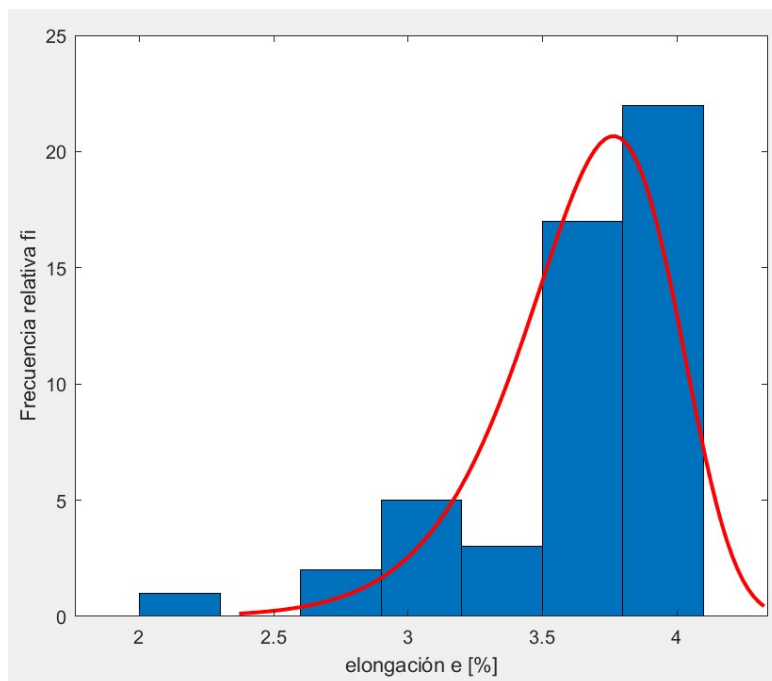


Figura 5.33 Frecuencia relativa  $f_i$  de rotura vs. Elongación  $e$  para fibra SMF 28 (6 metros de longitud)

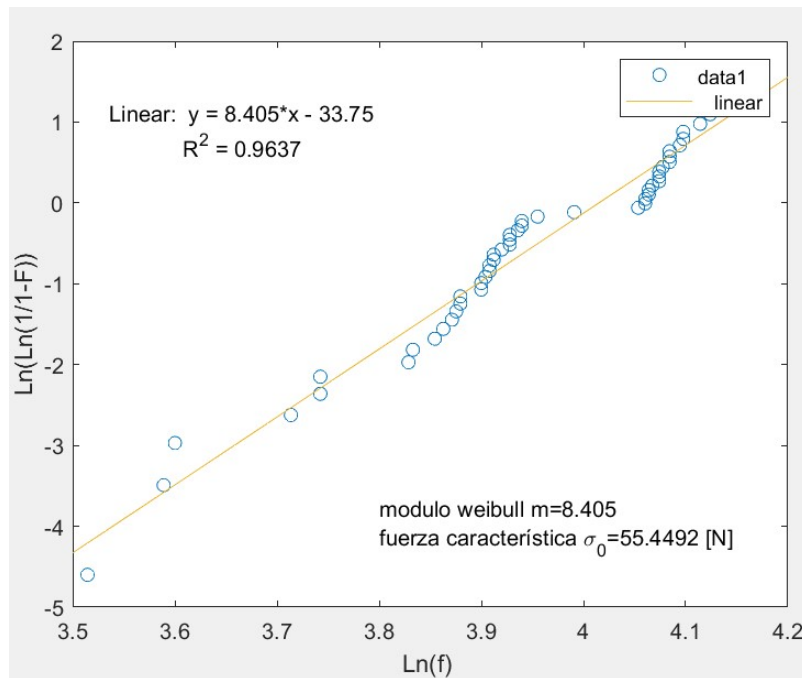


Figura 5.34 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. fuerza de rotura  $f$  en escala logarítmica con ajuste lineal (6 m de longitud)

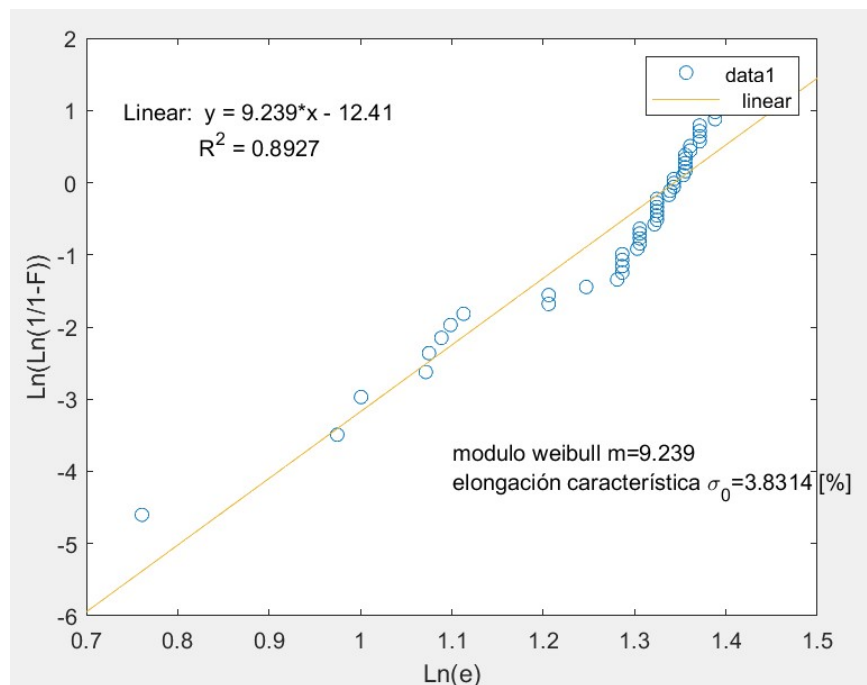


Figura 5.35 Probabilidad de falla  $F$  de fibra óptica SMF-28 vs. elongación  $e$  en escala logarítmica con ajuste lineal (6 m de longitud)

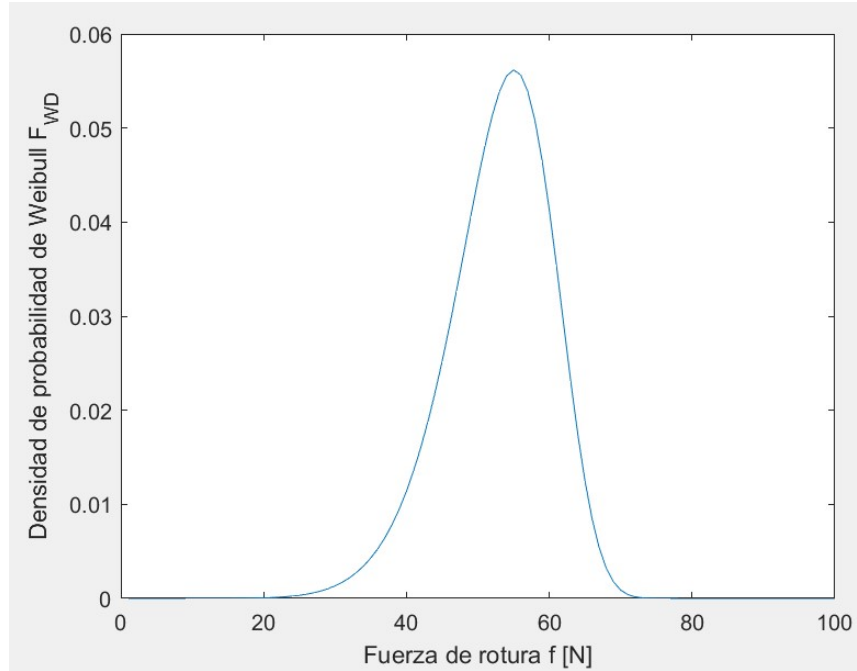


Figura 5.36 Densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  vs fuerza de rotura  $f$  de fibra SMF 28 (6 m de longitud)

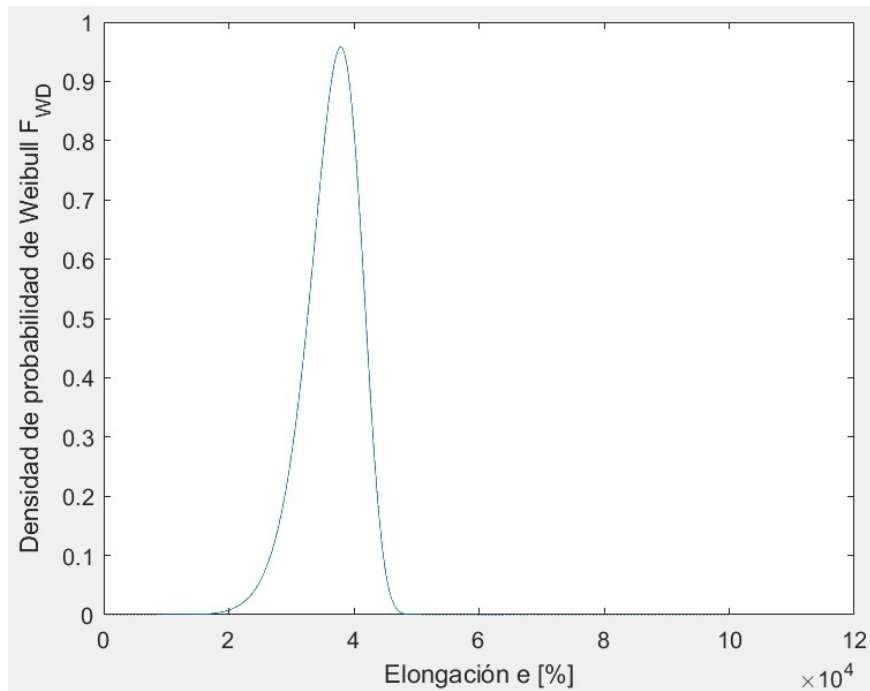


Figura 5.37 Densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  vs elongación  $e$  de fibra SMF 28 (6 m de longitud)



## 5.6 Discusión

En el proceso de ajuste a los datos experimentales se observa que las figuras 5.24 y 5.25 se muestran la distribución de probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  y la distribución de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  para diversos intervalos de fuerza de rotura  $f$  con fibra SMF-28 de 30 cm de longitud, es coincidente en los valores característicos que arrojaron (tabla 5.5) y por ende las distribuciones quedan muy parecidas.

La media de cada intervalo son representaciones aproximadas a los valores originales de los experimentos y que pese a esto pueden tener mejor correlación entre estos. Esta correlación recae en cuanto incertidumbre se tiene entre el valor original (del experimento) y el valor medio del intervalo de fuerza de rotura  $f$  con el que se aproximó a la probabilidad de falla  $F$  para su posición gráfica (ecuación 5-3).

Cuando se realizó la reducción de fuerza se vio una tendencia hacia valores de fuerza mayores, de 90 N en adelante, esto debido a que se eliminaron fuerzas inferiores de rotura que afectaban en la estadística presentada.

A pesar de la reducción de fuerzas, se muestra en la tabla 5.5 que la diferencia entre fuerzas característica  $\sigma_0$  es de apenas 3 N entre los valores extremos obtenidos, esto debido a que la mayoría de las roturas se encuentran en el rango de fuerza de rotura  $f$  de 90 a 95 N.

La mayor diferencia se ve en el módulo de Weibull  $m$ , teniendo repercusión directa en la cresta de la distribución de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$ , propiciada por la remoción de valores inferiores a 90 N.

En las pruebas realizadas con fibra óptica SMF-28 con longitud de 12 metros por medio de pruebas de tensión se dio un corte tajante al estar estirando las fibras, dentro de los resultados arrojados en la experimentación se obtuvo que en esta longitud (12 metros) de fibra óptica la media de elongación  $e$  de la fibra se tiene en torno a 2.134 [%], con una fuerza de rotura  $f$  promedio de 50.45 [N], sin embargo, la elongación  $e$  que tiene la fibra óptica va de 1.4[%] a 2.45[%], mientras que la respectiva fuerza de rotura  $f$  de la fibra fue de 28 [N] hasta 60 [N].

Las gráficas de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  obtenidas a partir de los datos de experimentación que se presentan en la figura 5.30 y figura 5.31 son curvas con tendencia ligeramente inclinadas a la izquierda hacia valores grandes, en la figura 5.30 (fuerza de rotura  $f$ ) se dio a partir de un módulo de Weibull de  $m=5.4$  y para la figura 5.30 (elongación  $e$ )  $m=4$ , concluyendo que los valores de fuerza de rotura  $f$  y elongación  $e$  tiene dispersión alta.

En contraparte, en las fibras ópticas con longitud de 6 metros se vio un aumento en la fuerza de rotura  $f$  y en la elongación  $e$  máxima que esta puede soportar, en cuanto a la elongación se vio una media  $e$  de 3.6293 [%] y una fuerza de rotura  $f$  media de 52.314 [N].

En las figuras 5.35 y 5.36 de densidad de probabilidad de elongación  $e$  (figura 5.35) y de fuerza de rotura  $f$  (figura 5.36) se obtuvieron curvas con tendencias ligeramente orientadas a la izquierda, pero con módulos de Weibull  $m$  mayores, teniendo curvas estrechas con rango de valores inferiores a las presentadas en fibras de 12 metros de longitud.

En un principio se pensó que al tener longitudes mayores de fibra óptica se presentarían más fallas en el tendido por lo cual tanto elongación  $e$  como fuerza de rotura  $f$  de la fibra serían menores en longitudes mayores y viceversa. Por medio de estas pruebas se confirmó esta teoría, aunque en particular las fuerzas de rotura encontradas en ambas longitudes no son tan diferentes, sin embargo, las elongaciones obtenidas difieren en 1 % aproximadamente.

## 5.7 Conclusiones

1. Se realizó un ajuste a las distribuciones de densidad de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  y probabilidad acumulada de Weibull  $F_W$  mediante pruebas en fibra óptica SMF-28, obteniendo valores característicos de fuerza de rotura  $\sigma_0$  y módulos de Weibull  $m$  para la distribución densidad de probabilidad  $F_{WD}$  asociada a la fibra.
2. Los gráficos de las densidades  $F_{WD}$  y probabilidades acumuladas  $F_W$  tienen comportamiento similar, los valores difieren unas cuantas decimas de [N] en caso de la fuerza característica y apenas una unidad en el módulo de Weibull  $m$ .
3. Al reducir el rango de la fuerza de rotura  $f$ , se obtuvieron densidades de probabilidad de Weibull  $F_{WD}$  de rotura con tendencia a mayores altos de fuerza de rotura, de 90 [N] hasta 105 [N].
4. El número de intervalos con mejor correlación entre los valores fue con 12 rangos de fuerza.
5. Debido a que la fuerza de rotura  $f$  muestra una dispersión relativamente grande, se intentó ver el efecto de descartar fibras débiles para conocer su repercusión en el análisis estadístico y hacer un filtrado de pruebas de rotura.
6. La elongación en fibras de 6 metros de longitud va de 2 a un 4 %, mientras que en longitudes de 12 metros es de 1.4 a 2.5%, mientras que las fuerzas de rotura de estas fibras son similares, para 6 metros tienen un valor medio de 52 N y para 12 metros de longitud es de 50 N.
7. El rango estadístico  $R$  es menor en fibras de 6 metros de longitud, lo cual propicia que la distribución de Weibull asociada a esta longitud tenga un módulo mayor y por ende una distribución estrecha.
8. Las distribuciones de densidad de probabilidad  $F_{WD}$  y probabilidad acumulada  $F_W$  Weibull obtenidas dan una representación gráfica a la fuerza de tensión  $f$  máxima que la fibra puede soportar, de igual manera para la elongación  $e$  máxima.

## 5.8 Referencias

- [1] D. Hernandez-Reyes, Las fibras ópticas como testigo de daño estructural con aplicaciones potenciales en el monitoreo del antiguo templo de San Agustín, Ciudad de México: Tesis de Licenciatura, UNAM, 2020.
- [2] D. R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, Stamford: Cengage Learning, Inc., 2010.
- [3] N. Wayne, «Probability Plotting of Complete and Singly Censored Data,» de *Applied Life Data Analysis*, Wiley, 1982, pp. 103-130.
- [4] A. González-González y E. Zulueta-Guerrero, «ESTRATEGIAS DE CONTROL DE AEROGENERADORES,» de *XVI Congreso de Confiabilidad*, San Sebastián, 2014.
- [5] T. Todinov, «Is Weibull distribution the correct model for predicting probability of failure initiated by non-interacting flaws?,» *International Journal of Solids and Structures*, nº 46, pp. 887-901, 2009.

## Conclusiones generales

1. Se propuso y analizó una red de monitoreo de daño estructural para el sistema colectivo Metro en líneas con secciones elevadas.
2. Se consideró el uso de fibra óptica como medio de transmisión de dicha red y como sensor (indicador, testigo) de daño estructural.
3. Se analizó diversas topologías de red y diversos tipos de fibras ópticas, y se demostró que tal red de monitoreo de daño estructura puede ser una alternativa eficaz y económica a los sistemas de monitoreo más complejos y costosos.
4. Se obtuvo datos experimentales sobre la fuerza máxima de tensión y la elongación máxima de la fibra óptica que se considera para dicha red (fibra monomodo SMF-28), y se realizó un análisis estadístico de estos datos mediante las distribuciones de probabilidad de falla de Weibull.
5. La importancia de los datos experimentales obtenidos está relacionada a la falta de respectivos datos en las publicaciones existentes, aunque son muy importantes en la evaluación de comportamiento de las fibras ópticas como sensores o detectores de daño estructural.
6. En conjunto, los resultados de este trabajo demuestran la factibilidad del sistema de monitoreo de daños estructurales que se propone y se investiga en este trabajo.