



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de un sistema de medición de temperatura para líneas de transmisión y distribución de energía utilizando sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg

Fabián Enrique Barón Moreno

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial
Bogotá, Colombia

2019

Diseño de un sistema de medición de temperatura para líneas de transmisión y distribución de energía utilizando sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg

Fabián Enrique Barón Moreno

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Telecomunicaciones

Director (a):

Ph.D. Gloria Margarita Varón Durán

Asesor:

Ing. Francisco Javier Amórtegui Gil M.Sc

Línea de Investigación:

Optoelectrónicas y comunicaciones ópticas

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en electrónica de alta frecuencia y telecomunicaciones

CMUN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2019

A mis padres, porque a ellos debo mi existencia, y a mi existencia este libro.

A mis hermanas y amigos, quienes me animaron a seguir adelante a pesar de las dificultades.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación no sería realidad sin la ayuda de quienes mostraron su interés y dedicaron un espacio de su tiempo y recursos en el presente trabajo, por lo cual es justo y necesario darles su debido reconocimiento.

Al Grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones – **CMUN**, quienes compartieron sus instalaciones, sus equipos de tecnologías ópticas y contactos para la consecución de los sensores, en especial a su directora, **Ph.D. Gloria Margarita Varón Durán**, quién me brindó su apoyo y dirección durante todo el transcurso del desarrollo de esta investigación y a **Ph.D. Germán Álvarez Botero**, por su colaboración y asesoría ya los demás miembros del grupo por su apoyo.

Al Laboratorio de ensayos Eléctricos **LABE** por suministrar los transformadores, el segmento de línea y demás equipos eléctricos usados en los experimentos realizados, en especial al profesor **Francisco Javier Amórtegui Gil**, por sus constantes asesorías en temas de electricidad y por el acompañamiento en los experimentos llevados a cabo en las instalaciones del LABE.

Por último, quiero agradecer al profesor **Daniel Pastor Abellán**, Catedrático de Universidad del Departamento de Comunicaciones en la Universidad Politécnica de Valencia, España. Por su valiosa colaboración en la fabricación de los sensores, que al final fueron usados para los experimentos de la presente investigación.

Resumen

Las redes de transmisión de energía son limitadas principalmente por dos factores, flecha de la catenaria, cuyo aumento lleva a incumplir distancias de seguridad, y la temperatura del conductor, cuyo aumento produce pérdidas en su tensión de rotura y un envejecimiento prematuro. Para evitar esto, las redes de transmisión se dimensionan de dos formas: estática, suponiendo las peores condiciones de carga y medioambientales, y dinámica, usando la temperatura del conductor para ajustar la carga de la línea.

Medir la temperatura en redes de transmisión de energía representa un reto dados los voltajes a los que ellas operan, para esto existen varios métodos y tecnologías que permiten medir directa o indirectamente la temperatura del conductor. Entre los métodos de medición directa está el uso de sensores de fibra óptica, los cuales tienen excelentes propiedades eléctricas y físicas propias de la fibra óptica. Dentro de los sensores ópticos están los sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBG).

En la presente investigación se hace uso de sensores FBG para medir la temperatura de un segmento a escala de una línea de transmisión bajo condiciones controladas, usando sensores FBG seleccionados de acuerdo con las condiciones de operación de las redes de transmisión colombianas. Se observa que la lluvia y radiación solar son las variables que más afectan la temperatura de la línea, se diseña un método de adhesión de los sensores FBG a la línea y finalmente se diseña un sistema de medición de energía para una línea ejemplo de 5 km.

Palabras clave: Sensores FBG, Líneas de transmisión, Sensores de fibra óptica, Redes de difracción de Bragg, Dimensionamiento estático, Dimensionamiento dinámico, Medición de temperatura.

Abstract

Power transmission lines are mainly limited by two factors, Sag, since an increase of it can reduce the clearance to ground and nearby objects, and the temperature of the conductor, since a high temperature causes loss in tensile strength and a premature ageing. To avoid that, power transmission lines are rated in two ways: Static Rating, assuming the worst-case conditions of load and weather, and Dynamic Rating, using the temperature of the conductor to calculate the load of the line.

Measuring the temperature of a power transmission line can be challenging due the high voltage that the sensors must withstand. Several methods and technologies exist to measure temperature directly or indirectly from the conductor. One of those direct measurement methods is the use of fiber optic-based sensors, which have excellent physical and electrical properties specific to fiber optics. Fiber Bragg Gratings sensors are one of the most used optical fiber sensor types.

In this research FBG sensors are used to measure the temperature of a power line segment, under controlled conditions using FBG sensors selected according to the operation conditions of the Colombian power networks. It was observed that rain and solar radiation affect the temperature of the conductor. A union method of the FBG sensors to the line was designed and last, a temperature measuring system was designed for a 5 km sample power transmission line.

Keywords: FBG sensors, Overhead Power Transmission lines, Optical fiber sensors, Fiber Bragg Gratings, Static line rating, Dynamic Line Rating, Temperature measurement.

Contenido

Pág.

Resumen IX

Lista de figuras XIII

Lista de tablas XV

Introducción 1

1. Marco teórico 7

1.1 Alternativas para incrementar la capacidad de una red de transmisión.....	8
1.1.1 Aumento del voltaje de operación.....	8
1.1.2 Uso de conductores de alta temperatura y baja flecha	8
1.1.3 Aumento de la corriente de conductor	8
1.1.4 Uso de haces de conductores	9
1.1.5 Monitoreo de los conductores y dimensionamiento dinámico	9
1.2 Dimensionamiento de las redes aéreas de transmisión eléctrica	9
1.2.2 Dimensionamiento estático.....	10
1.2.3 Dimensionamiento dinámico.....	11
1.3 Sensores basados en redes de difracción de Bragg FBG (Fiber Bragg Gratings) .	14
1.3.1 Principio de funcionamiento.....	15
1.3.2 Métodos de fabricación de los FBG	18
1.3.3 Tipos de FBG	19
1.3.4 Medición de temperatura con sensores FBG.....	22
1.4 Multiplexación en redes de sensores FBG	23
1.4.1 Multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing o WDM).....	23
1.4.2 Multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing o TDM).....	24
1.4.3 Multiplexación usando WDM y TDM.....	24
1.4.4 Multiplexación por división espacial (Spatial Division Multiplexing o SDM)	26
1.4.5 Multiplexación SDM, WDM y TDM.....	26
1.4.6 Multiplexación usando codificación espectral	27

2. Diseño del prototipo de pruebas del sistema de medición de temperatura.....29

2.1 Selección de los sensores FBG	30
2.2 Caracterización de los sensores FBG	31
2.2.1 Montaje	31
2.2.2 Caracterización de los sensores.....	33
2.2.3 Respuesta transitoria en el tiempo del sensor	36
2.2.4 Resultados y análisis de resultados.....	38
2.3 Primer experimento.....	38

2.3.1 Montaje	39
2.3.2 Resultados y análisis de resultados	41
2.4 Segundo experimento.....	43
2.4.1 Montaje.....	43
2.4.2 Resultados y análisis de resultados	45
2.5 Conclusiones.....	48
3. Diseño de un sistema de medición de temperatura	49
3.1 Requerimientos del sistema.....	49
3.2 Estructura del sistema	49
3.3 Selección de la topología de la red de sensores FBG y cálculo del rango del interrogador	50
3.4 Cálculo del presupuesto de potencia del sistema	52
3.5 Características del Interrogador.....	54
3.6 Caso con componentes del mercado.....	54
3.7 Conclusiones.....	56
4. Conclusiones y recomendaciones	57
4.1 Conclusiones.....	57
4.2 Recomendaciones.....	58
Bibliografía	77

Lista de figuras

Figura 1-1 Diagrama de la flecha de una catenaria [18].....	10
Figura 1-2 Diagrama de la ecuación de balance de calor de una línea aérea [18]. ...	11
Figura 1-3 Diagrama de la estructura y funcionamiento de un sensor FBG	15
Figura 1-4 Diagrama de bloques típico de un interrogador óptico [52].....	17
Figura 1-5 Diagrama esquemático de un sensor FBG inclinado [48].	20
Figura 1-6 Diagrama esquemático de un Chirped FBG. FBG con variación lineal del periodo [48].	21
Figura 1-7 Espectro de reflexión de un FBG superestructura [48].	21
Figura 1-8 Espectro de transmisión de un FBG con cambio de fase [48].	22
Figura 1-9 Diagrama de la combinación de técnicas de multiplexación WDM y TDM en sensores FBG en serie [48].	24
Figura 1-10 Diagrama de la combinación de técnicas de multiplexación WDM y TDM en sensores FBG en paralelo [48].	25
Figura 1-11 Diagrama de la combinación de técnicas de multiplexación WDM y TDM en sensores FBG usando derivaciones [48].....	25
Figura 1-12 Diagrama de un ejemplo de un sistema de sensores FBG usando SDM [61].	26
Figura 1-13 Diagrama de la representación espectral de un FBG espectralmente codificado y sus auto correlaciones y correlaciones cruzadas [62].....	27
Figura 2-1 Diagrama esquemático del montaje utilizado para la caracterización de los sensores FBG	32
Figura 2-2 Imagen de la cámara con aislamiento térmico y los sensores dentro de los tubos de cobre	33
Figura 2-3 Resultados preliminares del proceso de caracterización.....	34
Figura 2-4 Datos de la caracterización con promedio móvil de 60 muestras	35
Figura 2-5 Curvas características de los sensores FBG	36

Figura 2-6 Respuesta temporal del sensor dentro del tubo de cobre.	37
Figura 2-7 Diagrama esquemático del montaje	39
Figura 2-8 Imagen de la fijación de un sensor FBG sobre la línea.	40
Figura 2-9 Imagen de la fijación y recubrimiento del sensor FBG1	40
Figura 2-10 Imagen de la fijación de la fibra con amarres a separaciones regulares 41	
Figura 2-11 Resultados de las mediciones del primer experimento	42
Figura 2-12 Diagrama esquemático del segundo experimento	44
Figura 2-13 Imagen del proceso de entizado de los sensores (a) primera capa, (b) Entizado completo	45
Figura 2-14 Gráfico de los resultados del segundo experimento donde se muestra la corriente de línea, temperatura ambiente y temperatura de los sensores FBG ...	45
Figura 2-15 Gráfico de los resultados del segundo experimento donde se muestra la temperatura de los sensores FBG, temperatura ambiente e irradiancia solar	46
Figura 2-16 Gráfico de los resultados del segundo experimento donde se muestran la temperatura de los sensores FBG, temperatura ambiente y velocidad del viento 47	
Figura 3-1 Diagrama esquemático del sistema de medición de temperatura.....	50
Figura 3-2 Diagrama esquemático simplificado del sistema de medición de temperatura 52	
Figura 3-3 Diagrama esquemático simplificado para el último sensor	52
Figura 4-1 Diagrama del montaje para la fabricación de FBG por grabado interno (FBG Autoinducido) [48].....	61
Figura 4-2 Diagrama esquemático de la técnica de fabricación por interferómetro por división de amplitud [48].	62
Figura 4-3 Diagrama esquemático de la técnica de fabricación por interferómetro por división de frente de onda [48].....	63
Figura 4-4 Diagrama esquemático de la técnica de fabricación con máscara de fase [48]. 64	
Figura 4-5 Diagrama esquemático de la fabricación de FBG por el método punto a punto [48]. 65	
Figura 4-6 Diagrama esquemático del proceso de fabricación por proyección de mascara de fase [48].....	66

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1 Características de los sensores FBG36

Tabla 2-2 Valores máximos, mínimos y variaciones de temperatura registradas43

Introducción

En el dimensionamiento de líneas aéreas de transmisión eléctrica, la temperatura y la flecha de la catenaria son las principales limitantes debido a las distancias mínimas a tierra y a objetos cercanos, además debido a las temperaturas máximas soportadas por el conductor. Ambas limitantes están correlacionadas ya que un aumento en la temperatura del conductor produce una elongación, lo que incrementa su flecha y reduce las distancias de seguridad. Adicionalmente, si una línea de transmisión eléctrica es operada a altas temperaturas por periodos prolongados, se produce un envejecimiento prematuro de sus conductores dando como resultado elongaciones permanentes (Creep) y pérdida en la resistencia mecánica debido al recocido del material (Annealing).

La temperatura del conductor depende de varios factores tales como el efecto Joule, la temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, humedad, radiación solar y los coeficientes de radiación y absorción de los conductores, los cuales varían a lo largo de la línea y a través del tiempo. Por tales razones, las líneas aéreas de transmisión eléctrica son tradicionalmente dimensionadas de manera estática suponiendo las peores condiciones de operación y medioambientales para mantener la temperatura del conductor bajo el máximo admisible. Sin embargo, dichas condiciones tienen una baja probabilidad de ocurrencia por lo que la línea generalmente está sobredimensionada y en algunos casos, el riesgo de exceder la temperatura máxima del conductor existe.

Dada la demanda creciente por parte de los usuarios, la introducción y crecimiento de las fuentes renovables de energía, la generación local y la dificultad para instalar nuevas líneas de transmisión eléctrica, el dimensionamiento dinámico de las líneas de energía (Dynamic Line Rating o DLR por sus siglas en inglés) ha ganado mucho interés. El DLR se aplica en las redes de transmisión eléctrica con el fin de incrementar su eficiencia, aprovechando los momentos en los que las condiciones son favorables para la transmisión de energía. Como un ejemplo, en Colombia, las líneas aéreas de transmisión eléctrica son dimensionadas estáticamente y funcionan a temperaturas alrededor de los 45 °C a 50 °C, según

conversaciones con el profesor Francisco Amórtegui del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, y de acuerdo con un estudio realizado por [1] en la línea de transmisión Guavio-Tunal, las líneas de transmisión podrían transportar 70.9% más energía usando DLR que usando un dimensionamiento estático.

Para la implementación del DLR, la temperatura de los conductores necesita ser medida o calculada [2]. Varios métodos han sido propuestos y probados para calcular la temperatura de las líneas a partir de la medición de la flecha, la tensión mecánica y a partir de las condiciones climáticas [3]. Otros métodos miden la temperatura del conductor indirectamente debido a la dificultad de los sensores eléctricos de soportar voltajes altos. Otra manera de hacerlo es utilizando sensores puestos en la línea, tal como la Power Donut, que obtiene su energía de la propia línea y transmite datos usando RF [4]. Uno de los problemas de estos sensores es que pueden quedarse sin energía cuando la carga de la línea es baja y sufren de retardos en la transmisión debido a congestión de la red o a los saltos que da la información a través de los sensores de la red de sensores [5].

La medición de temperatura basada en sensores de fibra óptica conocidos como redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Gratings o FBG) es otra manera de medición directa de la temperatura del conductor que puede ser aplicada en líneas aéreas de transmisión eléctrica. Dado que dichos sensores son de fibra óptica, ellos tienen las mismas ventajas de ésta: son eléctricamente pasivos, debido a que no se alimentan de la red y no se calientan y por lo tanto no crean pérdidas en el sistema, son inmunes a la interferencia electromagnética y son pequeños y livianos. Más aún, como los sensores FBG son construidos en el núcleo de la fibra óptica, varios sensores pueden ser inscritos en una misma fibra, por lo tanto, se necesitaría una sola fuente de energía para todos los sensores. Adicional a las ventajas de la fibra óptica, los sensores FBG tienen una respuesta lineal a la temperatura y el estiramiento y la información de la medición está codificada en la longitud de onda por lo que son inmunes a variaciones de la potencia de la fuente y a las pérdidas por inserción.

Otras aplicaciones usando sensores FBG en líneas de transmisión aérea tales como [6], midieron exitosamente, durante 18 meses, temperatura y elongación para detectar las vibraciones causadas por el viento en las líneas de transmisión.

En este trabajo de investigación se planteó como objetivo el diseño de un sistema de medición de temperatura para redes de transmisión y distribución de energía utilizando sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg, este diseño puede ser una herramienta que permita a los operadores, poner a funcionar las redes de transmisión a temperaturas más cercanas a las temperaturas de diseño aprovechando la capacidad remanente de la red, además que con ésta tecnología se obtienen mediciones prácticamente en tiempo real. Para lograrlo se diseñó un prototipo de pruebas usando un tramo de línea ubicado a la intemperie, en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia, en donde se instalaron sensores ópticos seleccionados para la medición de temperatura, equipos de medición óptica proveídos por el grupo de investigación CMUN y equipos de medición y transmisión eléctrica proveídos por el Laboratorio de Ensayos Eléctricos (LABE).

El presente documento se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presentan los antecedentes del tema de investigación, mostrando el estado del arte de los sistemas de medición de temperatura con sensores FBG en líneas aéreas de transmisión eléctrica. En primer lugar, se muestra brevemente el problema de capacidad de transmisión de energía que afrontan actualmente las redes de transmisión, su origen y las alternativas que se han propuesto para solucionar el problema de capacidad en dichas redes. En segundo lugar, se muestran los diferentes métodos de medición de parámetros necesarios para dimensionar una línea de transmisión de energía, se presentan las diferentes tecnologías usadas en la medición de temperatura en las líneas aéreas de transmisión eléctrica y los efectos adversos que tiene el aumento de la temperatura en la capacidad de transmisión y en los conductores. Posteriormente se mostrarán brevemente las diferentes tecnologías de sensores ópticos usados para la medición de temperatura, entre ellos los sensores de difracción de Bragg (Fiber Bragg Gratings o FBG). Por último, el capítulo profundizará en los sensores FBG, su principio de funcionamiento, los métodos de multiplexación y su uso en diferentes aplicaciones, entre ellas el monitoreo de redes aéreas de transmisión de energía.

En el segundo capítulo se muestra el desarrollo del trabajo de investigación y los resultados obtenidos. En una primera instancia se muestra el proceso de selección y calibración de los sensores FBG que luego serán usados en las pruebas sobre la línea de transmisión. En segundo lugar, se muestran las primeras pruebas del sistema, con los sensores

calibrados, en una línea de transmisión de prueba y los resultados obtenidos, se discuten los efectos del método de adhesión de los sensores a la línea y se mejora dicho método en un segundo experimento desarrollado.

En el tercer capítulo, se propone el diseño de un sistema de medición de temperatura para una línea de 115kV, se determinan las características del interrogador necesario para el sistema y se hace un análisis del diseño usando equipos disponibles en el mercado.

El cuarto capítulo corresponde a las conclusiones y recomendaciones a las que da lugar el desarrollo de la tesis.

OBJETIVOS

Los objetivos que se plantearon para la presente tesis de grado son los siguientes:

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un sistema de medición de temperatura para redes de transmisión y distribución de energía utilizando sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg que pueda ser usado en un futuro como parte de un sistema de gestión y monitoreo de la red eléctrica colombiana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar los parámetros de desempeño del sistema. (rango de temperatura, distancia entre sensores, distancia de transmisión de datos y distancia mínima de ubicación de componentes electrónicos para el procesamiento).
- Determinar los parámetros de los sensores FBG necesarios para la medición de temperatura en líneas de transmisión (Rango de temperatura, Longitud de onda central).
- Diseñar un método para adherir la fibra óptica a las líneas de transmisión tal que se minimicen los efectos causados por deformación o tensión mecánica sobre el sensor.

- Determinar las características de un sistema de interrogación para discriminar la longitud de onda reflejada por cada uno de los sensores FBG dispuestos en la línea de transmisión.
- Realizar pruebas del sistema de medición de temperatura en un segmento a escala de una línea de transmisión, bajo condiciones controladas.

1. Marco teórico

Hoy en día las redes de transmisión de energía están llegando a los límites de la capacidad a las que fueron diseñadas, debido a varios factores como el incremento constante de la demanda de energía eléctrica, causada por el crecimiento poblacional y la industrialización. Otro factor es la necesidad de los operadores de sobrecargar la red, para transportar la energía adicional generada de manera intermitente por fuentes renovables de energía. Estas fuentes son generalmente incorporadas en la periferia de la red, donde dicha red no está diseñada para transportar grandes cantidades de energía [3], [7]–[10]. Incluso factores como el cambio climático pueden llegar a afectar a las redes de transmisión que operan más cerca de sus límites si un número de factores adicionales coinciden. Por ejemplo, el aumento de las temperaturas y la posibilidad de un aumento en la demanda para refrigeración de habitaciones y establecimientos [11].

En el caso de Colombia, según la proyección hecha en [12], el aumento de la demanda energética en el periodo 2019 a 2030 será en promedio del 3% anual considerando un escenario medio, y para el 2030, bajo el mismo escenario, se estima que el consumo de energía eléctrica pasará de 69.031 GWh en el 2016 a 105.018 GWh es decir un incremento del 52,1% en 15 años.

Para afrontar los retos impuestos por el aumento del consumo de energía y la distribución de los generadores, una de las posibles soluciones sería construir nuevas líneas de transmisión. Sin embargo, el alto precio de los terrenos, el descontento de los habitantes debido al impacto visual negativo y a la pérdida de valor de las propiedades aledañas, los efectos adversos en la salud debido a las radiaciones electromagnéticas [13] y los largos procesos para obtener el paso [8] hacen que esta posibilidad sea poco atractiva para los operadores de las redes.

1.1 Alternativas para incrementar la capacidad de una red de transmisión

Dadas las limitaciones que tiene construir nuevas redes de transmisión eléctrica, especialmente en ciudades y entornos densamente poblados, se han propuesto varias alternativas para aumentar la capacidad de la red. Entre las alternativas más comunes se encuentran:

1.1.1 Aumento del voltaje de operación

Aumentando el voltaje de operación, se puede aumentar la potencia transmitida manteniendo las corrientes y temperaturas de la línea. Sin embargo se deben garantizar las distancias de seguridad y los niveles de aislamiento necesarios para soportar las conmutaciones y descargas atmosféricas [8], [14]

1.1.2 Uso de conductores de alta temperatura y baja flecha

Una alternativa para incrementar la capacidad de las redes es aumentar la temperatura de operación de la red usando conductores de alta temperatura también denominados HTLS (High Temperature Low Sag), que, gracias a los materiales de los que están contruidos, pueden transportar hasta 2,5 veces más corriente y alcanzar temperaturas de hasta 250°C. La dificultad con éstos conductores es que cambiar a conductores HTLS resulta una alternativa con una inversión muy alta, incluso mayor a la construcción de líneas nuevas [15], [16] y que no es recomendado para distancias muy largas debido a la caída de voltaje [17].

1.1.3 Aumento de la corriente de conductor

Aumentar la corriente del conductor es posible aun cuando se ha alcanzado la flecha máxima permitida. Se puede acomodar la red para que funcione a una temperatura mayor y pueda transportar mayor cantidad de corriente siempre y cuando se aumenten las distancias de seguridad. Estas distancias de seguridad se pueden incrementar de varias maneras [8]:

- Re-tensionamiento de los conductores
- Cambio de aisladores por aisladores de materiales compuestos más cortos

- Reconfiguración de la torre aumentando su altura
- Dispositivos de flecha negativa que acorten los vanos cuando la corriente supere cierto nivel.
- Conductores con mayor área transversal

1.1.4 Uso de haces de conductores

En [15] se muestra una alternativa para aumentar la capacidad de la red de transmisión, que consiste en reemplazar el conductor de fase por varios conductores en paralelo con separación entre ellos de algunos centímetros. Esta alternativa presenta varias ventajas como la reducción de inductancias, aumento de la capacidad de transporte, disminución o eliminación del efecto corona, entre otros y, según su estudio, resulta la opción más económica entre la construcción de una nueva línea, el uso de conductores de mayor capacidad y el uso de conductores HTLS.

1.1.5 Monitoreo de los conductores y dimensionamiento dinámico

En sistemas donde no se monitorean las condiciones de operación de los conductores de una línea de transmisión, queda una parte de la capacidad real de la línea de transmisión no es aprovechada la mayor parte del tiempo. Hacer un monitoreo de la temperatura real del conductor, permite aprovechar más eficientemente las redes ampliando su capacidad sin tener que hacer mayores cambios en la red de transmisión. Para el caso de Colombia, la capacidad de la red se puede aumentar el 87,5% del tiempo y puede incrementarse hasta un 70,9% [1].

1.2 Dimensionamiento de las redes aéreas de transmisión eléctrica

La capacidad de una red de transmisión de energía está limitada por la temperatura del conductor, ya que un aumento de la temperatura causa una elongación que aumenta la Flecha de la catenaria. La flecha de una catenaria se define como la máxima distancia vertical entre la línea imaginaria que une los dos puntos de suspensión y el conductor [18], [19] como se muestra en la Figura 1-1.

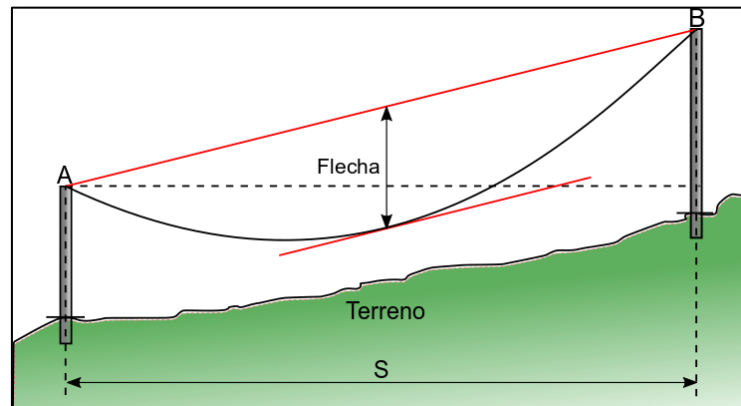


Figura 1-1 Diagrama de la flecha de una catenaria [18].

Al aumentar la flecha de la catenaria, se reducen las distancias de seguridad a tierra u objetos cercanos y se pueden llegar a incumplir las normas de seguridad [16], [20]–[23]. Además, la operación de las líneas de transmisión a altas temperaturas produce un envejecimiento prematuro de los conductores [24], [25], reduce la tensión de rotura [20], [26] y produce una elongación permanente del conductor (Creep) debido a un fenómeno conocido como recocido o Annealing [21]. Tales efectos aumentan el riesgo de fallo del conductor.

Varios autores definen la capacidad de corriente de una línea (Cargabilidad) como la corriente máxima transportada sin exceder las distancias de seguridad entre conductor – tierra, conductor – conductor y sin reducir la tensión de rotura [19], [27], [28]

Existen dos formas de dimensionar las redes de transmisión de energía, que son el dimensionamiento estático y el dimensionamiento dinámico.

1.2.2 Dimensionamiento estático

El dimensionamiento estático es aquel que calcula la cargabilidad de una línea de transmisión asumiendo las peores condiciones climáticas (baja velocidad del viento, temperatura ambiental alta, humedad alta y radiación solar alta) [21], [27], [29], [30], tales condiciones se presentan con poca frecuencia y en casos excepcionales, la temperatura de los conductores puede subir por encima de la temperatura máxima del conductor bajo condiciones “normales” de operación de la red [31], [32].

En algunos lugares, donde hay estaciones, las compañías tienen en cuenta este hecho para dimensionar una red [31]. Sin embargo, esto no se puede hacer en países tropicales como Colombia dado que no existen estaciones.

Por las razones expuestas anteriormente, se considera que las redes de transmisión están siendo subutilizadas dado que se podría aprovechar la capacidad de la línea cuando las condiciones climáticas son favorables.

1.2.3 Dimensionamiento dinámico

Para aprovechar al máximo la capacidad de los conductores, se han diseñado varios métodos que tienen en cuenta los factores ambientales, mecánicos y eléctricos que influyen en la variación de la temperatura del conductor, y por consiguiente su flecha, para calcular la capacidad de la red de manera dinámica [3], [4], [31]–[33].

Tales métodos usan mediciones directas de la temperatura u obtienen la temperatura a partir de otras mediciones y usan modelos matemáticos, como los basados en soluciones de la ecuación de balance de calor hechas por [28] y [34], que son las más aceptadas internacionalmente. En la Figura 1-2 se muestra de forma esquemática la ecuación de balance de calor.

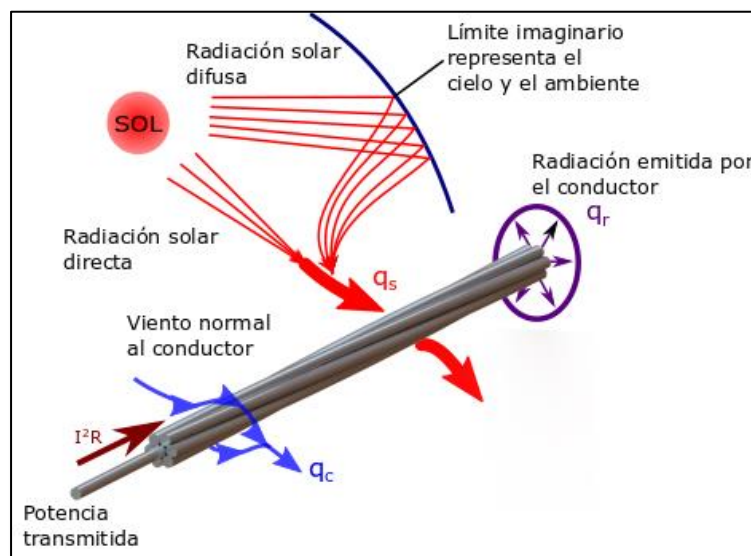


Figura 1-2 Diagrama de la ecuación de balance de calor de una línea aérea [18].

Los términos que tiene en cuenta la ecuación de balance de calor son:

- El calor aportado al conductor por el efecto Joule $i^2R(T_c)$
- El calor aportado al conductor por la radiación solar (Directa e indirecta g_s)

- Las pérdidas de calor producidas por convección (q_c)
- Las pérdidas de calor por radiación (q_r)

De los factores anteriores, los que producen una mayor pérdida de calor son las pérdidas producidas por convección, las cuales dependen de la temperatura ambiental, la dirección del viento y su velocidad, mientras que las pérdidas de calor por radiación tienen un menor impacto en la temperatura del conductor [23].

Estos métodos que solucionan la ecuación de balance, además necesitan información de factores climáticos circundantes que no pueden ser obtenidas con precisión debido a la variación de las condiciones climáticas a lo largo de la línea y entre la línea y la estación climática, además que algunas veces no están disponibles [10], [35].

Otros métodos usan sensores que toman mediciones para calcular la temperatura del conductor sin tener que medirla directamente:

- Medición de tensión del cable usando celdas de carga instaladas entre la estructura de la torre y uno de los extremos del aislador. [5], [8], [36].
- Cámaras y visión artificial que detectan un blanco fijado en la línea y calcula la flecha del conductor [36], [37].
- Sensores infrarrojos, que mide las radiaciones infrarrojas emitidas por el cable [21].
- PMU (Phasor Measurement Unit) que miden corriente, voltaje y sus ángulos de fase para medir la resistencia y obtener la temperatura promedio de la línea [35], [38].
- Réplicas de conductores instaladas cerca de la línea que estiman la influencia de las condiciones ambientales [8], [29], [36].

Por otra parte, existen los dispositivos que se instalan sobre la línea de transmisión y miden directamente la temperatura del conductor y otras variables. Estos sensores están al mismo voltaje de línea, por lo que deben obtener su alimentación de la misma línea, por inducción, usar baterías o paneles solares y las mediciones obtenidas por estos sensores se transmiten inalámbricamente a una estación base directamente o realizando saltos entre los sensores. Entre estos sensores están:

- Power Donut [8].
- Medición de vibraciones producidas por el viento que generan armónicos de una frecuencia fundamental que, en conjunto, son como una huella digital del vano a una flecha determinada y sólo dependen de la flecha [8], [36], [37].

▪ **Sensores ópticos**

Otro tipo de sensores que pueden ser usados en la medición directa de temperatura en las redes de transmisión, que son los que se usarán en el desarrollo de la presente tesis, son los sensores basados en fibra óptica. La aplicación de la fibra óptica en comunicaciones y en el desarrollo de diferentes tipos de sensores ha logrado grandes avances en las últimas décadas, teniendo aplicaciones en gran diversidad de aplicaciones como en el sector de Hidrocarburos. Esto debido a que los sensores de fibra óptica son altamente confiables, se pueden usar a distancias muy largas de la fuente de energía y se pueden multiplexar, varios o un solo tipo de sensores, en una sola fibra [39], [40]. Estos sensores se han empleado también en medicina como sensor de presión [41], como detector de nanopartículas [42] y medidor de movimientos cardiacos [43]. Han sido usados para la medición del encogimiento en concreto, medición de la variación espaciotemporal de la temperatura en zonas hiporreicas [44], entre otras aplicaciones en aeronáutica y el monitoreo de generadores eólicos [45].

Existen dos tipos principales de sensores ópticos; los sensores distribuidos que funcionan usando los efectos de retrodispersión de Brillouin y por el efecto Raman y los sensores discretos o multipunto, que se explican en apartados posteriores.

La retrodispersión de Brillouin consiste en que, al inyectar un pulso de luz a una fibra monomodo, a medida que se va propagando, refleja luz con una longitud de onda diferente. La longitud de onda reflejada depende de la temperatura y la deformación aplicada a la fibra. Este método tiene resoluciones de hasta 1 m en 30 km. La retrodispersión por efecto Raman, es similar a la Brillouin. En este caso las señales reflejadas conservan la misma longitud de onda, pero cambian su potencia reflejada a medida que se calientan en algún punto [46], [47].

Así pues, el dimensionamiento puede usar uno o varios de los métodos de medición de temperatura mencionados para calcular la capacidad de la línea en tiempo real y aunque los métodos de medición directa de temperatura son más precisos que los de medición indirecta, la tendencia de los sistemas de dimensionamiento dinámico es a usar sistemas híbridos [38].

En Colombia, [1] hicieron un estudio sobre el impacto que tendría incluir el dimensionamiento dinámico en las redes de transmisión usando PMUs y encontraron que se podría aumentar la capacidad de la línea un 87,5% del tiempo y transportar un 70.9% más corriente y también que se podrían reducir las pérdidas en un 39.27%.

1.3 Sensores basados en redes de difracción de Bragg FBG (Fiber Bragg Gratings)

El desarrollo las redes de difracción de Bragg en fibra óptica (FBG), empezó en 1978 cuando se estaban estudiando las propiedades no lineales de la fibra óptica, haciendo pasar por ella un láser de gran intensidad. Luego de una prolongada exposición, la fibra empezó a aumentar su reflectividad hasta reflejar casi toda la luz que incidía en la fibra. Al analizar el fenómeno se determinó que la reflexión de la luz se debía a la formación de una rejilla en el índice de refracción a lo largo del núcleo de la fibra, foto-inducida por una onda estacionaria formada por la luz incidente del láser, y la luz reflejada por el corte final de la fibra. Los puntos de máxima intensidad de la onda estacionaria alteraron periódicamente el índice de refracción de manera permanente formando así la rejilla. Estas rejillas se denominaron auto inducidas ya que se formaban espontáneamente [48].

Las fibras que se usaron en el experimento tenían un núcleo de un diámetro pequeño y estaban fuertemente dopadas con germanio. Se determinó que la rejilla formada tenía una reflexión del 90% a la onda del láser usado para crearlas (Láser de argón ionizado de 488 nm de longitud de onda) y que el ancho de banda de la rejilla era muy angosto (<200MHz) lo que le confería un gran potencial en aplicaciones de telecomunicaciones. Sin embargo, las rejillas sólo podían reflejar la longitud de onda del láser con el que eran creadas lo cual era una limitante importante, además, en ese momento se creía que el fenómeno de la fotosensibilidad de la fibra óptica se limitaba al tipo de fibra usada en ese experimento.

Posteriormente en 1987, [49] demostró que el fenómeno de fotosensibilidad se podía producir en varios tipos de fibra.

Otro hecho clave en el desarrollo de las FBG vino en 1987 cuando Meltz [50] irradió lateralmente una fibra dopada con germanio usando dos haces coherentes de 244 nm los cuales se cruzaban formando un patrón en el núcleo de la fibra, que moduló periódicamente el índice de refracción del núcleo. Además, se descubrió que, al cambiar el ángulo de intersección de los haces, se cambiaba el espaciamiento entre los máximos del patrón interferométrico, lo cual permitía construir rejillas que reflejaran casi cualquier longitud de onda y permitir su uso en telecomunicaciones.

1.3.1 Principio de funcionamiento

Los sensores FBG son en esencia un filtro pasa banda con un ancho de banda muy pequeño. Como se mencionó en el apartado anterior, consisten de alteraciones periódicas del índice de refracción del núcleo a lo largo de la fibra óptica.

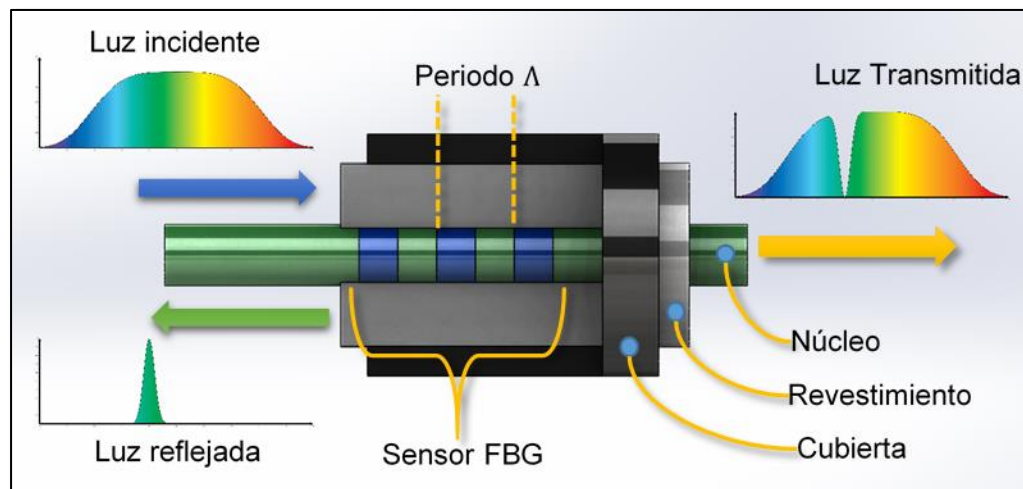


Figura 1-3 Diagrama de la estructura y funcionamiento de un sensor FBG

Cada alteración en el índice de refracción tiene un espaciamiento igual a la mitad de la longitud de onda de la luz reflejada, así, en cada cambio del índice de refracción, una pequeña parte de la luz que cumple con la condición de Bragg (Ecuación (1.1)) es reflejada, y todas las pequeñas reflexiones se combinan de manera coherente para formar un haz de luz mayor [48]. En la ecuación (1.1) se tiene que λ_B es la longitud de onda de Bragg, η_{eff} es el índice de refracción efectivo y Λ es el tamaño axial de la alteración del índice de refracción.

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2 \frac{2\pi\eta_{eff}}{\lambda} \Rightarrow \lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

A medida que la temperatura del sensor cambia, o se aplica una tensión axial a la fibra, el periodo y el índice de refracción de las perturbaciones cambian, haciendo que cambie la condición de Bragg y se refleje una longitud de onda diferente [48]. Usando la ecuación (1.1), el cambio de la longitud de onda reflejada se puede expresar con la ecuación (1.2).

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial\eta_{eff}}{\partial l} + \eta_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial\eta_{eff}}{\partial T} + \eta_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (1.2)$$

Donde:

- $\Delta\lambda_B$ es el cambio de la longitud de onda de Bragg
- η_{eff} es el índice de refracción efectivo del sensor
- Λ es el periodo de la perturbación del núcleo
- Δl es el cambio de la longitud del sensor debido a la tensión
- ΔT es el cambio de temperatura del sensor

La ecuación (1.2) tiene dos términos independientes, el primero representa el efecto de la tensión en el espaciamiento de la rejilla y en el índice de refracción efectivo, mientras el segundo, refleja el efecto de la temperatura en el índice de refracción y en el espaciamiento de la rejilla.

Teniendo en cuenta sólo el efecto de la elongación debida una la tensión sobre la fibra, el primer término de la ecuación (1.2) se puede expresar como:

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z \quad (1.3)$$

En esta ecuación:

- $\Delta\lambda_{BS}$ corresponde al cambio en la longitud de onda de Bragg debido a la tensión
- λ_B es la longitud de onda de Bragg
- p_e es la constante foto elástica de la fibra definida en [48], [51].
- ε_z es la tensión aplicada en el eje axial del sensor FBG

De la misma manera, considerando sólo el efecto de la temperatura, el segundo término de la ecuación (1.2) se puede escribir como:

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_\eta)\Delta T \quad (1.4)$$

Donde:

- $\Delta\lambda_{BT}$ es el cambio en la longitud de onda de Bragg debido a la temperatura.
- α_Λ es el coeficiente de expansión térmica para la fibra.
- α_η corresponde al coeficiente termo-óptico de la fibra.
- ΔT es el cambio de temperatura
- λ_B es la longitud de Bragg del sensor

Teniendo en cuenta los efectos que la tensión y la temperatura tienen sobre las propiedades de los FBG, se pueden obtener mediciones de un cambio de temperatura o tensión leyendo un cambio en la longitud de onda reflejada por el FBG.

▪ Principio de funcionamiento de un interrogador

Para leer el cambio de la longitud de onda reflejada por los sensores FBG, se utiliza un dispositivo llamado interrogador óptico. Un interrogador óptico consiste principalmente de una fuente de amplio espectro, un circulador óptico o acoplador, y un bloque de detección y procesamiento dispuestos como se muestran en la Figura 1-4.

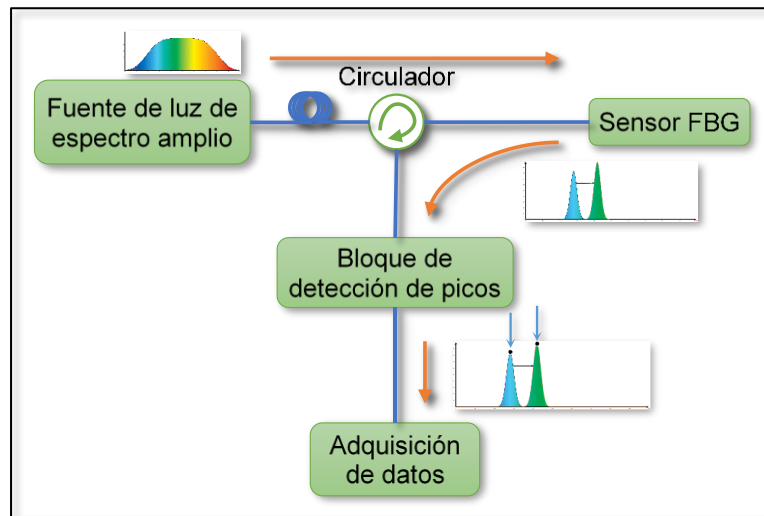


Figura 1-4 Diagrama de bloques típico de un interrogador óptico [52].

El principio de funcionamiento del interrogador consiste en que la fuente de luz de amplio espectro inyecta un haz de luz a la fibra óptica, la cual dirige el haz hasta el puerto 1 del circulador óptico.

Un circulador óptico es un dispositivo de 3 o 4 puertos que toma las señales que entran por un puerto y las redirige al puerto siguiente. Por ejemplo, en un circulador óptico de 3 puertos, los haces de luz que entran por el puerto 1, salen por el puerto 2 y los haces de luz que entran por el puerto 2, salen por el puerto 3.

De esta manera, la luz que entra por el puerto 1 del circulador óptico en la Figura 1-4, proveniente de la fuente de amplio espectro, es dirigida al puerto 2 del circulador y a los sensores FBG.

Los sensores FBG reflejan un haz de luz con una longitud de onda específica de vuelta al puerto 2 y salen por el puerto 3 del circulador, rumbo al bloque de detección de picos, el cual detecta la potencia del haz de luz en las diferentes longitudes de onda. Dichos datos son enviados al bloque de adquisición de datos donde se procesan y se detectan los picos de potencia óptica reflejados por los sensores FBG.

1.3.2 Métodos de fabricación de los FBG

Desde la invención del método de fabricación por interferometría, se han desarrollado otras técnicas de fabricación, cada una con ventajas diferentes. Los objetivos principales de los métodos de fabricación son los siguientes [51]:

- Flexibilidad: para seleccionar la reflectividad y longitud de onda deseadas
- Producción en masa de bajo costo: la producción en masa y a altas velocidades disminuye los costos de los FBG en el mercado
- Buenas propiedades físicas y ópticas: La resistencia de la fibra óptica no debe ser afectada por la fabricación del sensor y un ancho de banda pequeño y pocas pérdidas son características deseables.
- Repetibilidad: los métodos de fabricación deben garantizar repetibilidad en la longitud de onda central y la reflectividad de las fibras.

Entre estas técnicas se encuentran [48]:

- Fabricación por grabado interno
- Fabricación con interferómetro por división de amplitud
- Fabricación con interferómetro por división de frente de onda
- Fabricación con interferómetro con fuente variable
- Fabricación con máscara de fase

- Fabricación punto a punto
- Fabricación por proyección de máscara de fase

Siendo la fabricación con máscara de fase, la más común y la usada para la fabricación de los sensores usados en el desarrollo de este proyecto. Las descripciones de cada técnica de fabricación se muestran en el anexo A

1.3.3 Tipos de FBG

Actualmente existen varios tipos de FBG que difieren tanto en la forma de las rejillas como en el periodo, la modulación del índice de refracción y su método de fabricación. Según su método de fabricación se clasifican en:

- **FBG tipo I**

Son las más comunes, son fabricadas con fibras fotosensibles normales a intensidades moderadas. Estas fibras tienen una buena estabilidad para temperaturas menores de 200°C. A temperaturas mayores, el índice de refracción cambia y vuelve a un estado natural haciendo que decaiga la reflectividad del FBG

- **FBG tipo IIA**

Los FBG tipo IIA tienen las mismas características espectrales y el proceso de fabricación es similar al de los FBG tipo I, sin embargo, dicho proceso es mucho más largo necesitando de aproximadamente 30 minutos de exposición para desarrollar la fibra. La diferencia con los FBG tipo I radica en el mecanismo que produce el cambio en el índice de refracción que confiere a este tipo de FBG una estabilidad térmica mayor presentando un decaimiento en su reflectividad sólo a temperaturas cercanas a los 500°C

- **FBG tipo II**

Estos FBGs son fabricados con luz ultravioleta de muy alta intensidad, como por ejemplo un láser Eximer de Fluoruro de Kriptón. Esta radiación produce en la fibra un fenómeno de ionización similar al daño inducido por láser en dispositivos ópticos y crea la rejilla del FBG. Estos FBG se comportan de manera casi idéntica a las FBG tipo I, pero son más estables térmicamente, llegando a temperaturas por encima de los 1000°C y han sido usadas para fabricar arreglos de FBGs mientras la fibra es sacada de la torre de extracción [53].

Según la forma de las alteraciones en el núcleo de la fibra se tienen:

- **FBG largas**

Estos FBG son rejillas mucho más largas que las convencionales, llegando a medir decenas de centímetros.

- **FBG inclinadas**

En estos FBG las perturbaciones generadas en el núcleo de la fibra tienen un ángulo de inclinación respecto al eje de la fibra lo que hace que haya acoplamiento entre modos de propagación del núcleo y del revestimiento de la fibra. Estos FBG han sido usados en el aplanamiento de la curva de ganancia de los Amplificadores de fibra dopados con Erblio (Erbium Doped Fiber Amplifier o EDFA) y tienen una relación de señal a ruido uniforme en el receptor [54], también ha sido usados para la conversión de modos.

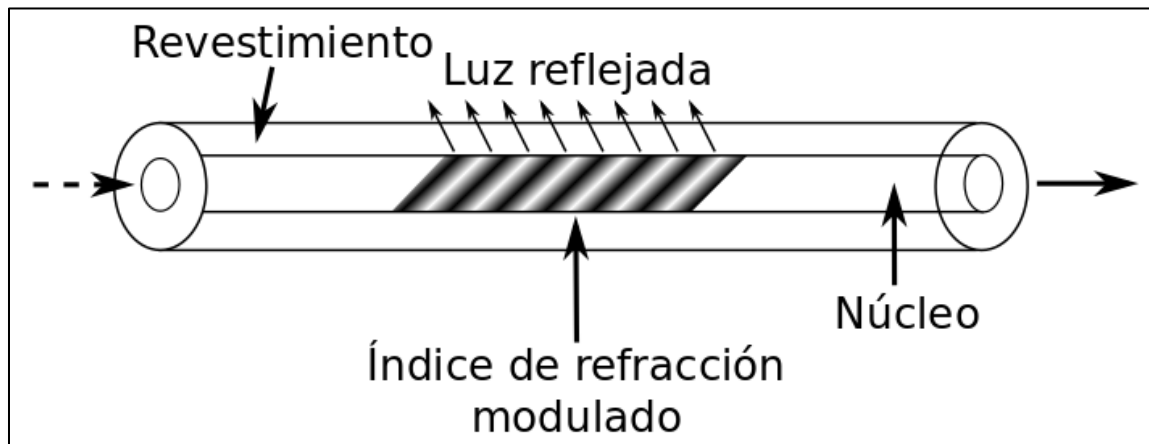


Figura 1-5 Diagrama esquemático de un sensor FBG inclinado [48].

- **Chirped FBG**

Los Chirped FBG son FBG cuyo periodo varía de manera monótona a lo largo del FBG como se muestra en la Figura 1-6.

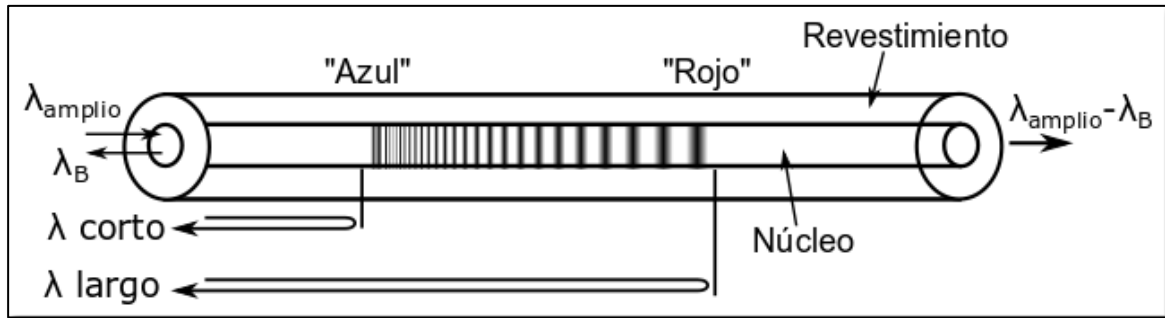


Figura 1-6 Diagrama esquemático de un Chirped FBG. FBG con variación lineal del periodo [48].

Los chirped FBG lo que hacen es agregar un retardo específico a longitudes de onda específicas, con lo que se pueden usar en aplicaciones de compensación de dispersión cromática ocurrida en enlaces de alta tasa de bits y grandes distancias donde los pulsos de luz sufren un ensanchamiento temporal.

▪ **Superestructuras**

Una superestructura en FBG consiste en la fabricación de las rejillas usando un haz de luz modulado a lo largo de la fibra. Estos tipos de FBG tienen un espectro de reflexión con varios puntos máximos (ver Figura 1-7). Estos FBG pueden ser usados como filtros tipo peine para procesamiento de señal.

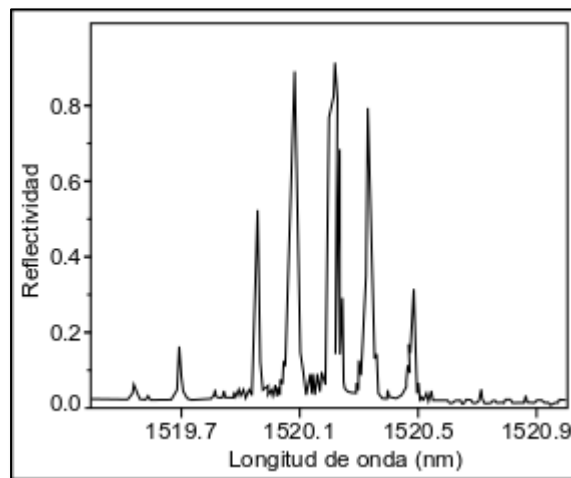


Figura 1-7 Espectro de reflexión de un FBG superestructura [48].

▪ **FBG con cambio de fase**

Estos FBGs consisten en la introducción de un cambio de fase a lo largo del FGB. Tal cambio de fase produce dos FBGs que están fuera de fase uno del otro que actúa como un resonador Fabry-Perot selectivo que permite que la luz a la longitud de onda resonante, penetre el FBG. Estos FBG se usan en filtros de anchos de banda muy angostos, para obtener láseres DFB de un solo modo o para fabricar filtros comb si se introducen varios cambios de fase en el FBG. El espectro de un FBG con cambio de fase se muestra en la Figura 1-8.

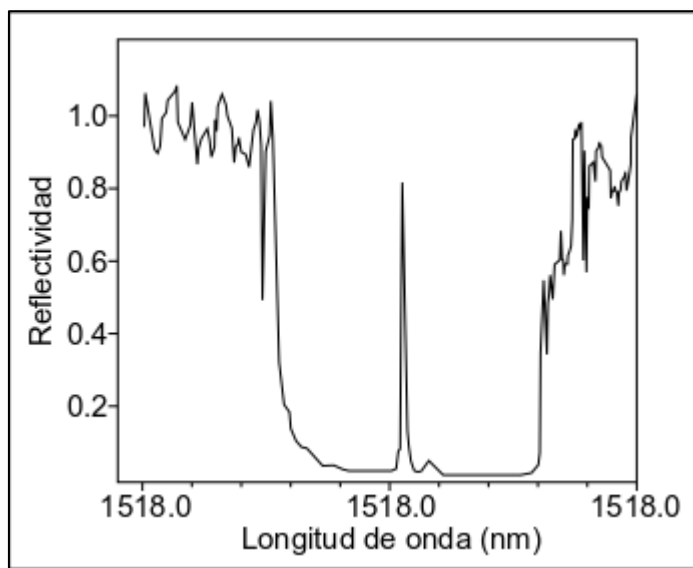


Figura 1-8 Espectro de transmisión de un FBG con cambio de fase [48].

1.3.4 Medición de temperatura con sensores FBG

Como se mencionó en la sección 1.3.1, los sensores FBG son sensibles a cambios de temperatura y de elongación, además poseen ventajas sobre los sensores eléctricos como inmunidad a la interferencia electromagnética, aislamiento eléctrico, son eléctricamente pasivos, y tienen un tamaño y peso reducidos.

Los sensores FBG han sido ampliamente usados para medición de temperatura en condiciones donde los sensores eléctricos no pueden emplearse como en [39] donde se analiza el uso de FBG para medir temperatura y presión en pozos petroleros y se concluye que los FBG se mantienen estables a temperaturas de 230 °C por periodos de hasta 5 años.

En [55], se muestra que pueden ser aplicados en la medición de temperatura de las barras del estator de un generador de energía eléctrica, en turbinas de generación, usando FBG tipo II operando a temperaturas de hasta 800°C.

En [56] se propone un sistema para medición de temperatura y tensión de una línea de potencia usando una red de sensores FBG y en [57], el autor usa un sensor FBG para monitorear una línea de transmisión de energía de 400 kV por un periodo de 2 años. En dicho artículo, el autor concluye que, usando las mediciones de temperatura del sensor, se podría aumentar el transporte de energía entre un 25% – 30%

1.4 Multiplexación en redes de sensores FBG

Los sensores FBG son sensores puntuales, sin embargo, el hecho de que puedan crearse varios sensores en la misma fibra y de que dichos sensores usen una única fuente y compartan el mismo sistema de interrogación, les brinda un potencial para su aplicación en redes de sensores distribuidos.

Reducir el número de componentes para procesamiento y para alimentar los sensores, reduce en gran manera los costos de implementación de un sistema de sensores, además de reducir su peso. Para usar el mayor número de sensores usando una sola fuente de luz, es necesario aplicar varias técnicas de multiplexación entre las cuales se encuentran:

1.4.1 Multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing o WDM)

Una de las características más importantes de los sensores FBG es que la información medida está codificada en la longitud de onda reflejada por el sensor, lo que hace que las mediciones sean independientes de la potencia de la fuente y las diferentes variaciones en la intensidad de la luz causadas por pérdidas de inserción ni acopladores. La codificación en la longitud de onda, junto con los diferentes métodos de fabricación, permite dividir el espectro de la fuente de luz incidente a la fibra en varios segmentos y asignarlos a cada sensor FBG, con lo cual, al analizar cada segmento de espectro, se puede obtener la medición tomada por cada sensor.

1.4.2 Multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing o TDM)

La multiplexación por división de tiempo (TDM) consiste en enviar un pulso de luz a un arreglo de sensores, que pueden tener la misma longitud de onda, y están ubicados a diferentes distancias a lo largo de la fibra. Esto provoca que los pulsos reflejados por cada sensor tengan un retardo diferente, lo que permite distinguir entre cada sensor.

1.4.3 Multiplexación usando WDM y TDM

Usando WDM se pueden usar varios sensores FBG por fibra, pero dado que los FBG normalmente tienen una reflectividad de un bajo porcentaje, una parte de la energía queda sin usar. Al combinar WDM con TDM, se puede reusar el espectro de la fuente y multiplicar el número de sensores. Existen varias maneras de mezclar éstas dos técnicas, colocando en serie, arreglos de FBG con longitudes de onda escalonadas (Figura 1-9), colocando varios arreglos idénticos de FBG en paralelo, pero agregando un retardo diferente a cada uno (Figura 1-10) o colocando en cascada varias derivaciones conectadas cada una, a un arreglo idéntico de sensores FBG (Figura 1-11).

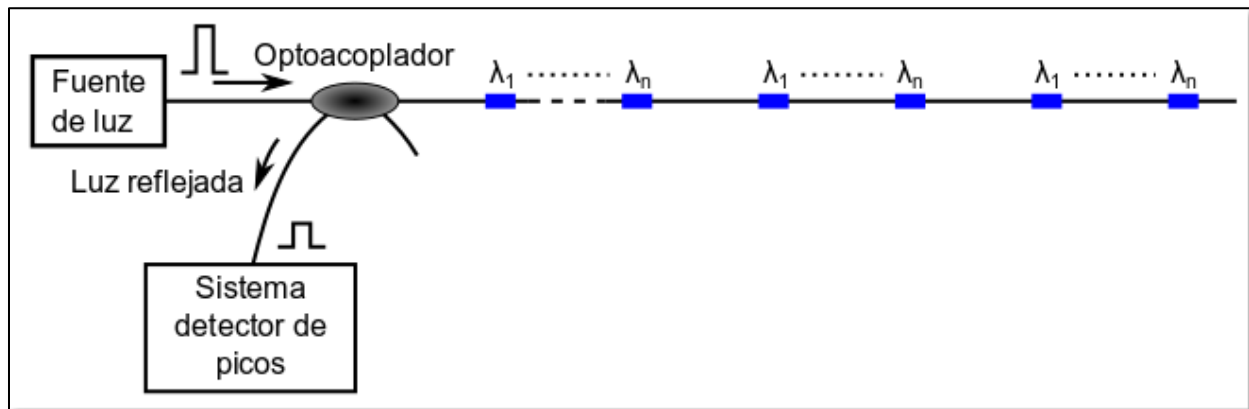


Figura 1-9 Diagrama de la combinación de técnicas de multiplexación WDM y TDM en sensores FBG en serie [48].

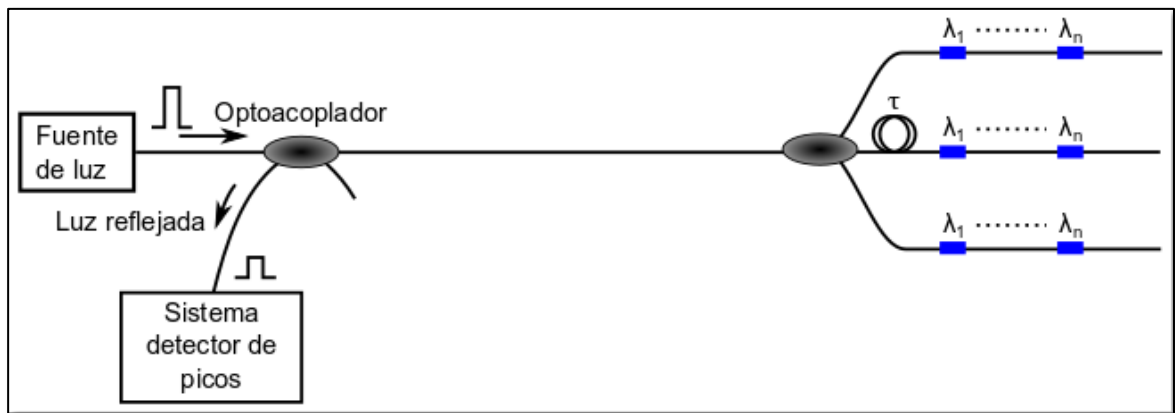


Figura 1-10 Diagrama de la combinación de técnicas de multiplexación WDM y TDM en sensores FBG en paralelo [48].

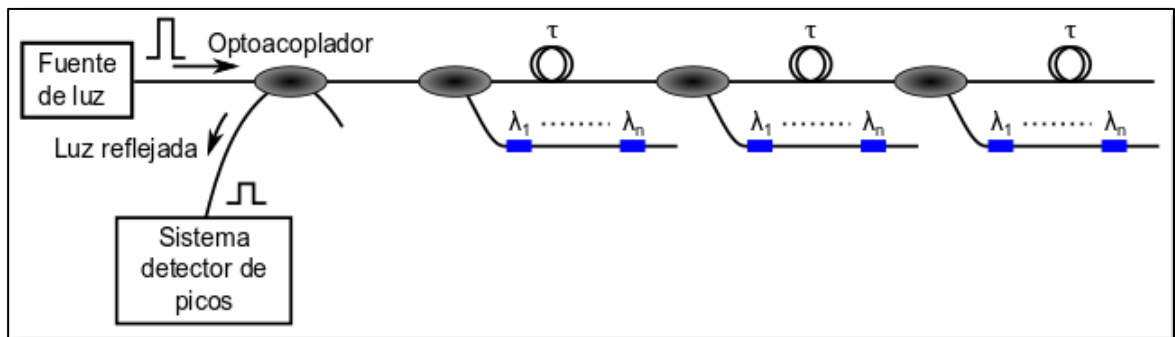


Figura 1-11 Diagrama de la combinación de técnicas de multiplexación WDM y TDM en sensores FBG usando derivaciones [48].

En la configuración en serie, es necesario usar sensores FBG de baja reflectividad para que una porción de la potencia llegue a los siguientes sensores que comparten la misma longitud de onda. En esta configuración las principales limitantes están dadas por el CrossTalk de reflexiones múltiples y el enmascaramiento espectral. El primero consiste en que el pulso de luz reflejado por los sensores más alejados de la fuente regrese al detector al mismo tiempo que un nuevo pulso reflejado por los sensores más cercanos al detector. El segundo se refiere al enmascaramiento espectral que producen los primeros sensores en los sensores subsiguientes que comparten su longitud de onda. Con este tipo de multiplexación, se han logrado redes de hasta 2000 sensores [58].

En las configuraciones paralelo y derivaciones, se pueden usar sensores FBG de alta reflectividad dado que en estos casos no existe enmascaramiento espectral, sin embargo, estas dos configuraciones requieren una mayor cantidad de dispositivos ópticos (Fibra y acopladores) para construir la red.

1.4.4 Multiplexación por división espacial (Spatial Division Multiplexing o SDM)

En aplicaciones donde se requieren mediciones puntuales como en aeronáutica y aplicaciones de seguridad, se requiere operar los sensores de manera individual, además de ser cambiados sin tener que hacer un proceso de calibración. En estos escenarios, los esquemas de WDM y TDM no son apropiados, por lo que la multiplexación por división espacial usando la arquitectura en paralelo es la indicada. Un ejemplo de SDM se muestra en la Figura 1-12

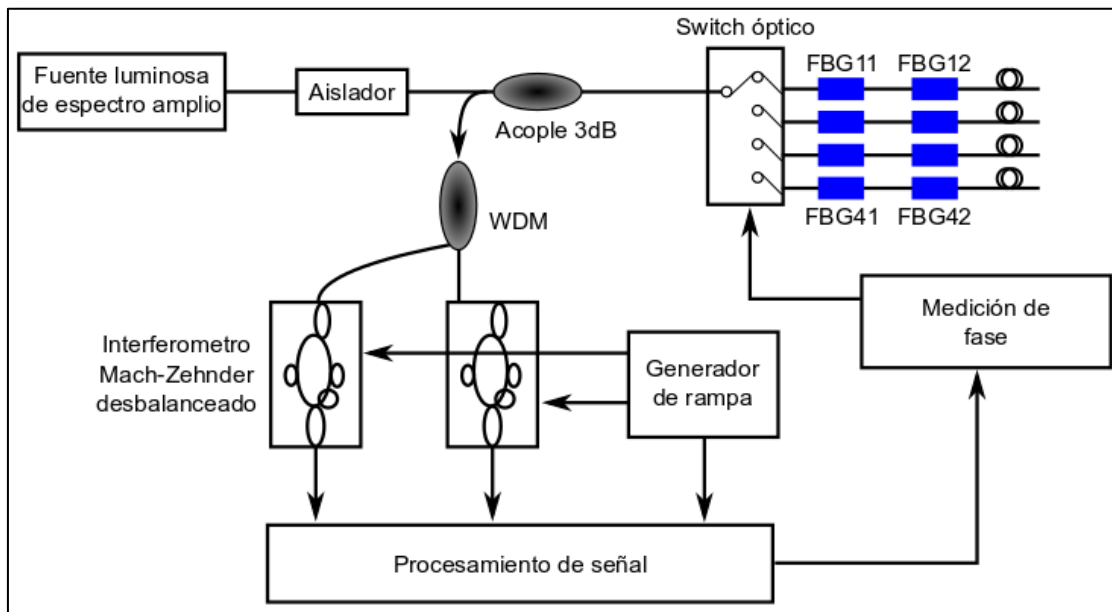


Figura 1-12 Diagrama de un ejemplo de un sistema de sensores FBG usando SDM [59].

1.4.5 Multiplexación SDM, WDM y TDM

La combinación de TDM y WDM en topología serial hace un uso efectivo de la fuente de energía, las combinaciones en paralelo, como SDM, permiten intercambiar sensores y operarlos de manera independiente. La combinación de las topologías seriales y paralelas puede incrementar aún más la cantidad de sensores FBG en una red, haciéndola en una red de sensores bidimensional.

1.4.6 Multiplexación usando codificación espectral

En WDM la principal limitante es el traslape de los espectros de sensores con longitudes de onda adyacentes. En esta multiplexación, los sensores deben estar espectralmente separados según su rango de operación y dejando una porción de espectro de guarda. Estas condiciones limitan el número de sensores en un determinado rango de longitudes de onda.

Para solventar este problema, [60] proponen y demuestran el uso de FBG espectralmente codificados. El principio de funcionamiento de estos FBG consiste en usar Códigos ópticos ortogonales (Optical Orthogonal Codes u OOC), similares a los usados en sistemas de comunicaciones OCDMA, para definir la respuesta espectral de los FBG. Usando esta técnica es posible distinguir entre múltiples sensores que operan en la misma región espectral usando el decodificador apropiado. En la Figura 1-13 se muestra la respuesta espectral de dos sensores usando códigos ortogonales diferentes y la correlación que existe con sí mismo y con el otro sensor.

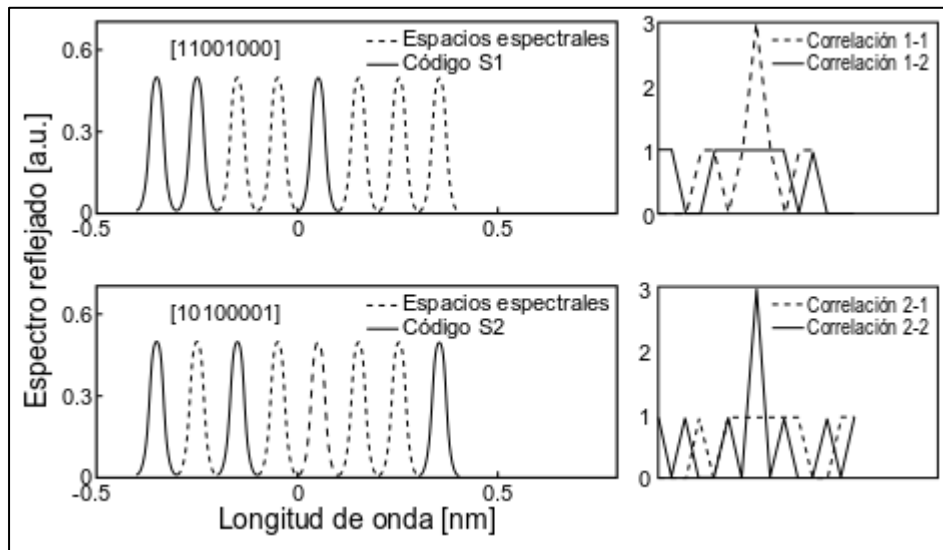


Figura 1-13 Diagrama de la representación espectral de un FBG espectralmente codificado y sus auto correlaciones y correlaciones cruzadas [60].

2. Diseño del prototipo de pruebas del sistema de medición de temperatura

Con el objetivo de diseñar un sistema de medición de temperatura para redes de transmisión y distribución de energía usando sensores FBG, aplicó la siguiente metodología:

- Determinar los rangos de temperatura presentes en las redes de transmisión en Colombia.
- Seleccionar el tipo de sensores FBG que se pueden usar de acuerdo a los rangos de temperatura de las redes de transmisión.
- Realizar una prueba exploratoria del sistema de medición de temperatura usando sensores FBG en un segmento de pruebas de una línea de transmisión de energía.
- Analizar los datos e identificar los aspectos a mejorar.
- Realizar un prototipo de pruebas del sistema de medición de temperatura en un segmento a escala de una línea de transmisión, bajo condiciones controladas.

Inicialmente se seleccionaron los sensores que se iban a usar, teniendo en cuenta los rangos de temperatura manejados actualmente en las redes de transmisión en Colombia (sección 2.1).

Posteriormente se hizo una caracterización de los sensores seleccionados para determinar la longitud de onda central de cada sensor y su curva característica temperatura – longitud de onda, además de una caracterización de su respuesta transitoria a cambios de temperatura (Sección 2.2), para luego realizar un primer experimento y observar el funcionamiento del sistema de medición de temperatura, en un segmento de red de transmisión bajo condiciones controladas y empezar a diseñar un método de adhesión de los sensores al conductor eléctrico (Sección 2.3).

Luego, tomando la experiencia adquirida en el primer experimento, se procedió a mejorar el método de adhesión de los sensores y ver las variaciones de temperatura en la línea de transmisión manteniendo valores constantes de corriente (Sección 2.4).

2.1 Selección de los sensores FBG

Para seleccionar los sensores a utilizar en el sistema de medición de temperatura, se tuvieron en cuenta tres aspectos:

- Rango de temperatura
- Longitud de onda central
- Sensibilidad

Para seleccionar los sensores FBG a utilizar, es importante tener en cuenta los rangos de temperatura presentes en la operación de una red de transmisión, dado que, como se mencionó en la sección 1.3.3, cuando se supera la temperatura máxima del sensor, el índice de refracción vuelve a su estado normal y pierde sus propiedades, en otras palabras, se “borra” el sensor.

Según conversaciones con el profesor Francisco Amórtegui del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia y según el capítulo 3 de [15], en Colombia las redes de transmisión de energía, están dimensionadas para que la temperatura del conductor no supere los 75 °C y en casos de emergencia 90 °C, por lo cual los sensores que sean seleccionados, deben trabajar en estos rangos de temperatura.

Teniendo en cuenta esta restricción, se adquirió el sensor os1200 de Micron Optics, éste sensor es un arreglo de 5 FBGs distanciados 1 m cada uno y con un rango de temperatura de -40 °C a 120 °C [61] el cual cumplía con los requerimientos de temperatura de las redes de transmisión eléctricas. Adicionalmente, y gracias a la colaboración del profesor Daniel Pastor, miembro del grupo Photonics Research Labs (PRL) del instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politécnica de Valencia, España, se utilizó el sistema de inscripción de FBG que el grupo de investigación posee para fabricar una fibra óptica con 3 sensores FBG, espaciados a 1 m cada uno.

Inicialmente se hicieron pruebas en el laboratorio con el sensor os1200, sin embargo, este sensor resultó ser muy frágil y difícil de manejar, por lo que se optó por sensor de la

universidad de valencia. Este arreglo de sensores es el que se usó en los experimentos que se detallan más adelante.

Como se explicó en la sección 1.3.1, los sensores FBG son sensibles a las variaciones de temperatura y tensión, por lo que fue necesario encontrar un método para que fueran insensibles a los efectos de la tensión que pudiera ser causada por el cable de la línea de transmisión al momento de ser fijado. Revisando la hoja de datos del sensor SmartTemp, del fabricante SmartFibres [62], se encontró que el fabricante usa un encerramiento tubular para aislar el sensor FBG de la tensión externa. Se decidió entonces, insertar cada uno de los sensores en tubos de cobre de 2 mm de diámetro y 15 cm de largo, y se fijó cada sensor en uno de los extremos del tubo con pasta térmica, con el propósito de que, al momento de fijar el sensor a la línea, se fije el tubo de cobre y este se expanda o se contraiga libremente mientras que el sensor se mantiene en su condición normal de tensión y así evitar el efecto de la tensión en las mediciones.

2.2 Caracterización de los sensores FBG

Para comprobar las características de los sensores fabricados en la Universidad Politécnica de Valencia, se hace una caracterización de la longitud de onda reflejada vs temperatura y se hallan sus ecuaciones y curvas características.

Inicialmente el sensor FBG usado tiene tiempos de respuesta a cambios de temperatura menores a 1 segundo, sin embargo, al meter los sensores dentro del tubo de cobre, se agrega una inercia térmica que hace que la respuesta a cambios de temperatura sea más lenta, por lo que también se hace una caracterización de la respuesta temporal del sensor dentro del tubo de cobre, a cambios de temperatura.

2.2.1 Montaje

Para la caracterización en temperatura del sensor, se utilizó una cámara con aislamiento térmico, la cual dispone de varias resistencias encargadas de generar calor, una termocupla para medir la temperatura y un controlador que se encarga de regular la temperatura al interior de la cámara. Es importante anotar que la exactitud del controlador

de temperatura depende de su calibración de fábrica, por lo que las medidas de temperatura de los sensores reflejan un cambio respecto a una temperatura inicial.

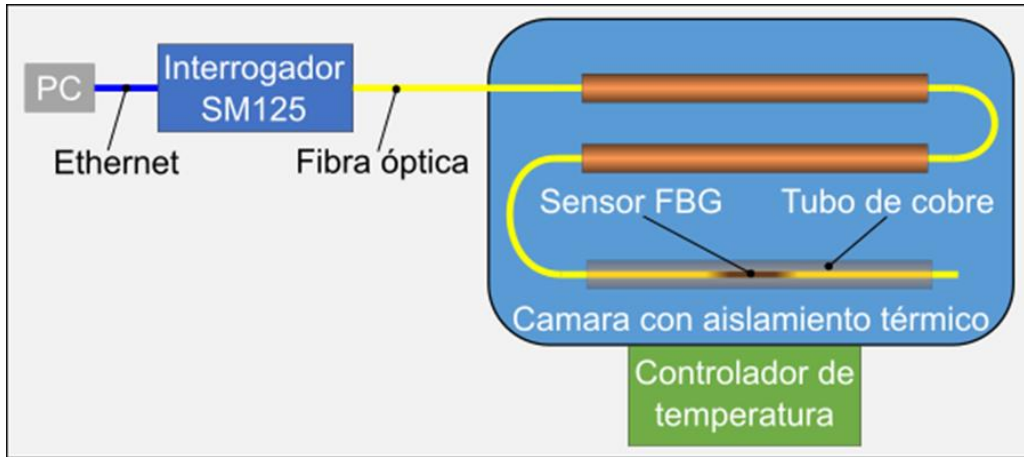


Figura 2-1 Diagrama esquemático del montaje utilizado para la caracterización de los sensores FBG

Para obtener las mediciones procedentes de los sensores FBG se usó un interrogador óptico (ver sección 1.3.1), SM125 de Micronoptics, el cual hace un barrido por un rango de longitudes de onda, obtiene la potencia óptica reflejada en cada longitud y las envía vía Ethernet a un computador portátil donde se almacenan las mediciones para su posterior procesamiento (Ver Figura 2-1).

Todos los sensores, insertados en sus respectivos tubos de cobre, se colocaron dentro de la cámara y se caracterizaron al mismo tiempo.

Como se observa en la Figura 2-2, se colocó una lámina de aluminio en contacto directo con las resistencias calefactoras, esto con el fin de distribuir de manera más uniforme la temperatura entre los sensores y la termocupla usada para el control de la temperatura.

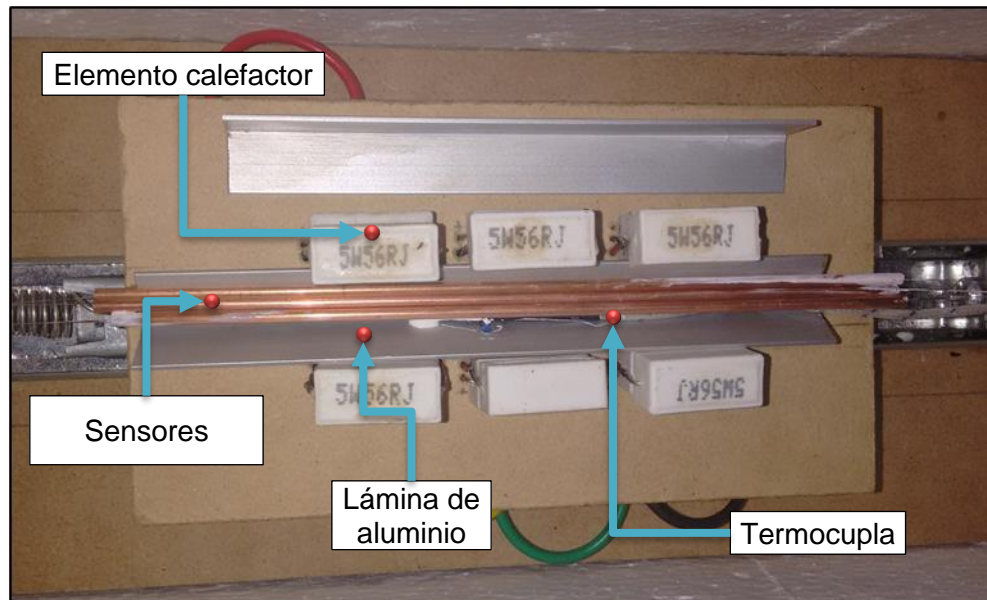


Figura 2-2 Imagen de la cámara con aislamiento térmico y los sensores dentro de los tubos de cobre

2.2.2 Caracterización de los sensores

El procedimiento utilizado para la caracterización de los sensores es el siguiente:

- Se introducen todos los arreglos de sensores FBG con sus respectivos tubos de cobre dentro de la cámara con aislamiento y se cierra para minimizar las variaciones de temperatura debidas a efectos externos.
- Se programa el controlador para que la temperatura llegue a un punto fijo.
- Se toman mediciones de las longitudes de onda de los sensores y se espera a que la temperatura se estabilice alrededor del valor de referencia.
- Se programa un nuevo valor de temperatura y se vuelve a esperar a que se estabilicen los valores de temperatura de los sensores.
- El proceso se repite en varios escalones de temperatura desde los 25 °C hasta los 65 °C con variaciones entre cada escalón de 5 °C

Los resultados del proceso anterior se muestran en la Figura 2-3. Dado que cada sensor FBG tienen una longitud de onda central a 25 °C diferente, para poder visualizar todos los sensores en la misma gráfica, se tomó la longitud de onda mínima reflejada por cada sensor como valor de offset que es restado a todas las muestras. Para el sensor FBG1, la

longitud de onda mínima reflejada fue de 1557,70 nm, para el FBG2, 1562,7 nm y para el FBG3, 1567,47 nm.

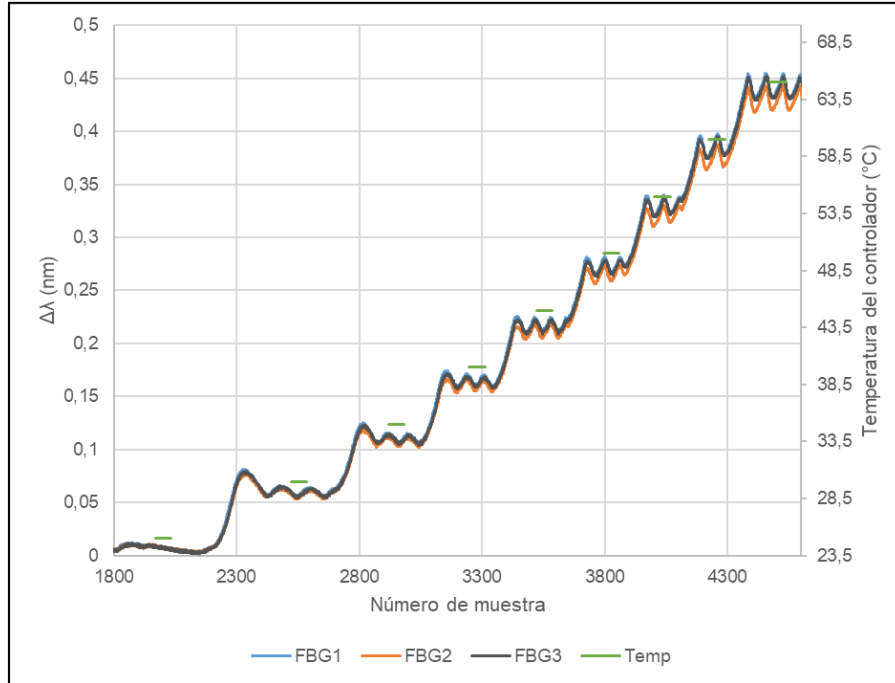


Figura 2-3 Resultados preliminares del proceso de caracterización

En la Figura 2-3 tenemos en el eje horizontal el número de muestra de las mediciones de los sensores FBG1, en azul, FBG2 en naranja y FBG3 en gris oscuro, además se tiene la temperatura objetivo del controlador (Temp) en verde. En el eje vertical izquierdo se tiene la variación de la longitud de onda reflejada (longitud de onda reflejada menos el valor mínimo global de cada sensor) en nanómetros de los sensores FBG1, FBG2 y FBG3. En el eje vertical derecho se tiene la temperatura objetivo del controlador en $^{\circ}\text{C}$.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura objetivo del controlador se varia en pasos de 5 $^{\circ}\text{C}$ desde los 25 $^{\circ}\text{C}$ hasta los 65 $^{\circ}\text{C}$, lo cual se ve reflejado en los segmentos de líneas verdes.

Se ve en la figura que, al dejar las curvas de los sensores, sustrayendo el valor mínimo medido de cada sensor, las gráficas de los 3 sensores tienen comportamientos muy similares y empiezan a notarse diferencias a temperaturas más elevadas.

Además, se puede notar una variación periódica en la temperatura medida por los sensores FBG, debidas al tipo de control usado en la cámara, el cual era tipo On/Off.

Sobre los datos de la Figura 2-3 se hace un promedio móvil de 65 muestras, con lo que se obtiene la Figura 2-4. En esta figura se grafican los datos de los sensores FBG1, FBG2 y FBG3 con el promedio móvil en el eje vertical izquierdo y en el eje vertical derecho, se muestra la temperatura objetivo del controlador (Temp). En esta figura se observa una medición estable por parte de los sensores FBG, en el centro del escalón de temperatura de donde se puede obtener la longitud de onda correspondiente a la temperatura objetivo del controlador.

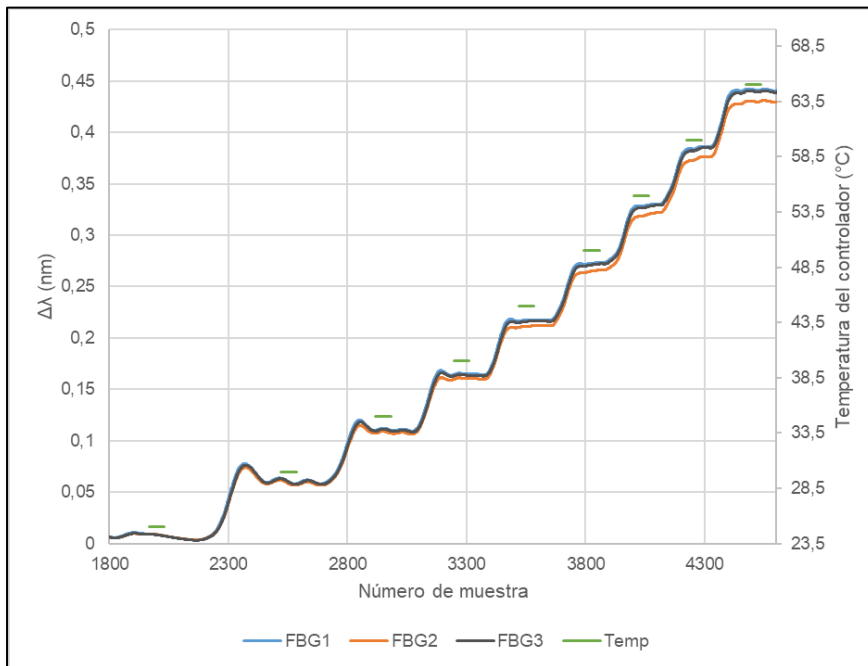


Figura 2-4 Datos de la caracterización con promedio móvil de 60 muestras

Para esto se toman los datos originales obtenidos del interrogador y se hace un promedio de las 65 muestras que están bajo los segmentos de líneas de la referencia del controlador (Temp) de la Figura 2-3 y la Figura 2-4, por ejemplo, para obtener la longitud de onda del escalón de temperatura 40°C , se promediaron las muestras 3246 a 3310 de cada sensor, obteniendo que para 40°C , la longitud de onda reflejada correspondiente a esta temperatura es de 1557,87 nm para FBG1, 1562,86 nm para FBG2 y 1567,63 para FBG3. Se repite el mismo procedimiento para los demás escalones de temperatura, los resultados se muestran en la Figura 2-5.

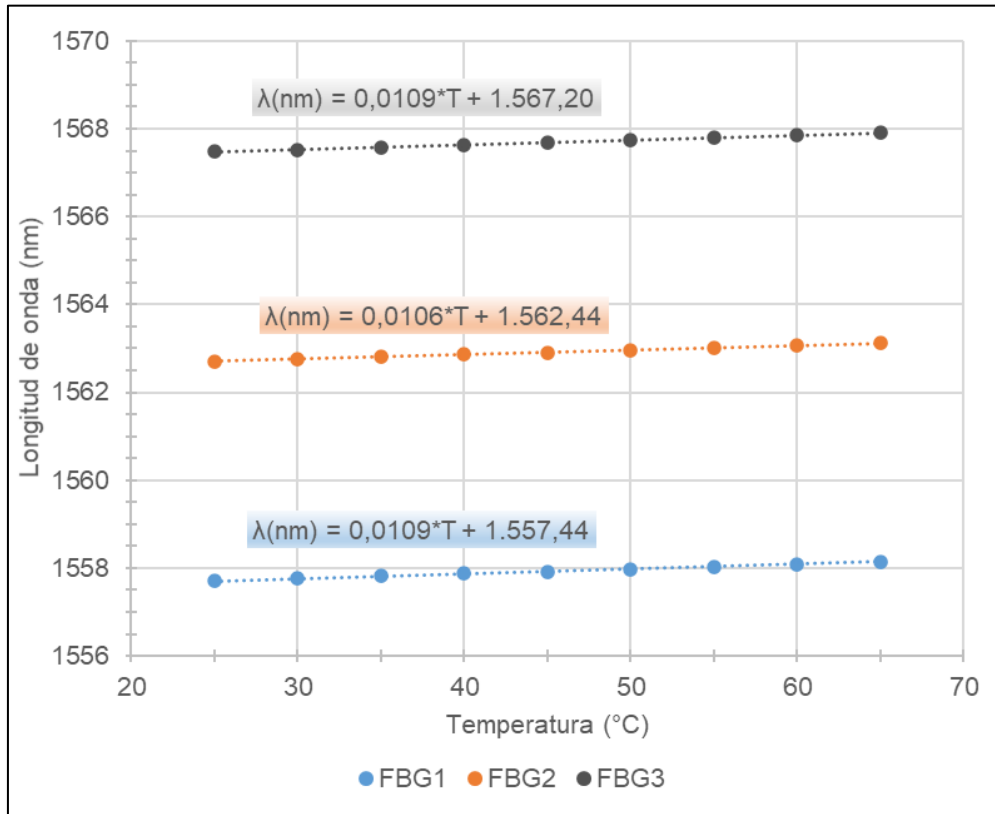


Figura 2-5 Curvas características de los sensores FBG

En la Figura 2-5 se muestra la longitud de onda reflejada, en nanómetros, en el eje vertical; en el eje horizontal, la temperatura en °C y la gráfica de los sensores FBG1 en azul, FBG2 en naranja y FBG3 en gris oscuro. De la gráfica se observa que las respuestas de los 3 sensores son lineales con offset diferentes. En la Tabla 2-1 se resumen las características de los 3 sensores.

Tabla 2-1 Características de los sensores FBG

Sensor	λ @ 25 °C (nm)	Sensibilidad (pm/°C)
FBG1	1557,71	10,9
FBG2	1562,71	10,6
FBG3	1567,48	10,9

2.2.3 Respuesta transitoria en el tiempo del sensor

La respuesta de los sensores FBG a los cambios de temperatura, son muy cortas (menores de 1 segundo), pero debido al tubo de cobre en el que se inserta el sensor, el tiempo de

respuesta del sensor aumenta debido a la inercia térmica del tubo, por tal razón se caracterizó la respuesta temporal de uno de los sensores (FBG1).

La caracterización de la respuesta temporal se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se coloca el sensor con el tubo dentro de la cámara, sin cerrarla, y se programa a una temperatura de 60 °C, el sensor se coloca en contacto directo con la lámina de aluminio.
- Se espera a que el sensor llegue y se estabilice a la temperatura máxima que pueda alcanzar.
- Una vez alcanzada la máxima temperatura, se saca el sensor rápidamente y se suspende de los extremos del tubo de cobre, fuera de la cámara.
- Se espera a que el sensor llegue a la temperatura ambiente.

Los resultados de esta prueba se muestran en la Figura 2-6.

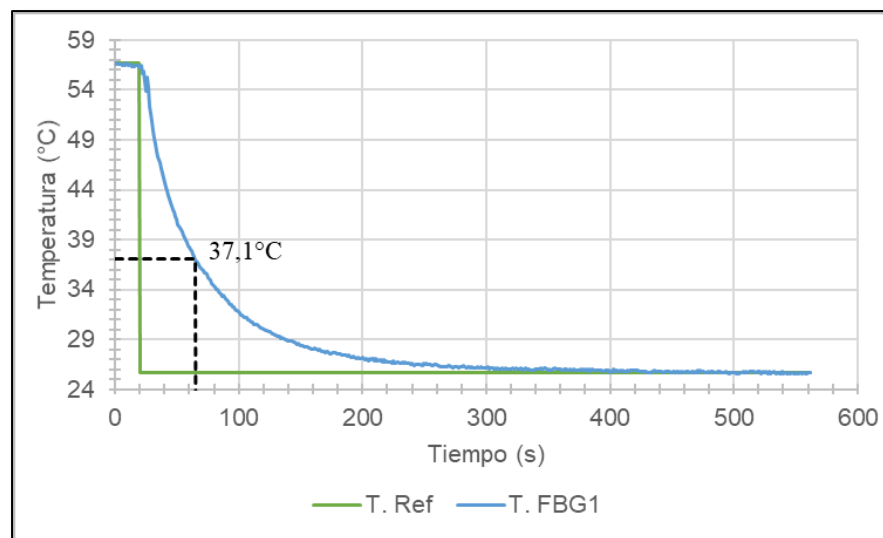


Figura 2-6 Respuesta temporal del sensor dentro del tubo de cobre.

En el eje vertical de la Figura 2-6 se grafican el escalón de temperatura aplicado al sensor (T. Ref en verde), junto con la temperatura medida por el sensor FBG1 (T. FBG1 en azul), ambas medias en °C y en el eje horizontal de la figura se tiene el tiempo en segundos. De la gráfica se puede observar que la respuesta temporal del sensor es la de un sistema de primer orden.

Del análisis de los datos se tiene que la temperatura inicial del escalón fue de 56,6 °C y la temperatura final fueron 25,7 °C, dando una variación de 30,9 °C. Para encontrar la constante de tiempo del sensor, se mide el tiempo que le toma en alcanzar los 37,1 °C que corresponden a un decremento del 63,2% de la variación total de la temperatura. El tiempo de respuesta (τ) del sensor con el tubo de cobre es de 45 segundos, con lo cual se puede inferir que en un tiempo de 180 segundos (4τ), el sensor estará dentro del 2% de su temperatura final.

2.2.4 Resultados y análisis de resultados

De la caracterización de los sensores se puede concluir que los sensores FBG utilizados en el sistema de medición de temperatura, tienen una respuesta lineal, con pendientes muy similares, con separaciones de longitudes de onda central de aproximadamente 5 nm entre cada sensor, y teniendo en cuenta que la sensibilidad de los sensores es de máximo 10,9 pm/°C, se necesitaría una diferencia de temperatura de 458 °C entre dos sensores espectralmente adyacentes para que se solapen totalmente.

También se concluye que la constante de tiempo de un sensor FBG insertado dentro del tubo de cobre es de 45 segundos, que es más de 6 veces menor que la constante de tiempo de un cable típico de una línea de transmisión [18], [28].

2.3 Primer experimento

Para la implementación del prototipo de medición de temperatura, se hace primero una prueba exploratoria del sistema de medición de temperatura, usando sensores FBG, en un segmento de pruebas de una línea de transmisión de energía, para encontrar posibles dificultades y aspectos a mejorar. En este caso se toman medidas de la temperatura ambiente, corriente de línea y las longitudes de onda reflejadas por los sensores.

Se procede a instalar los sensores FBG caracterizados en un segmento de línea aérea ubicada en el interior de la Universidad Nacional usada para pruebas, se varía la corriente en pasos de 0 Amperios, 42 amperios, 73 amperios y de vuelta a 0 amperios con duraciones de alrededor de 50 minutos y se toman mediciones de temperatura ambiente.

2.3.1 Montaje

El segmento de línea en donde se instala el sistema de medición de temperatura tiene alrededor de 6 metros de largo por 3 metros de altura y un cableado All-Aluminum Alloy Conductor (AAAC) de 48,69 MCM. Allí se fijan los sensores FBG1, FBG2 y FBG3 a 2, 3 y 4 metros respectivamente. Uno de los sensores se cubre, junto con el conductor de la línea, con una capa de vinilo para ver el efecto del aislamiento térmico sobre el sensor. El montaje se esquematiza en la Figura 2-7.

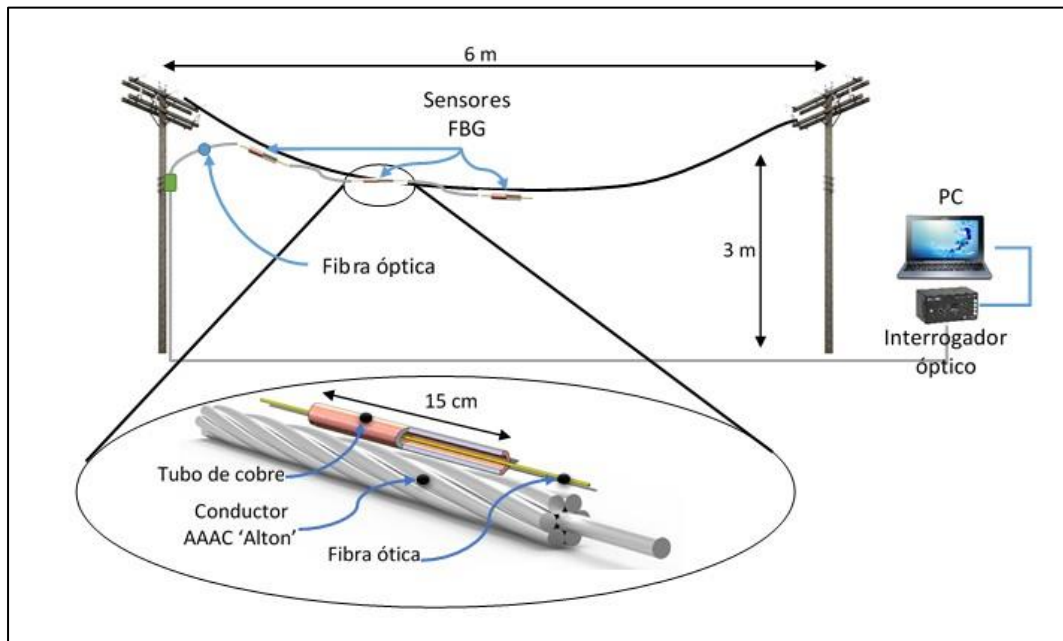


Figura 2-7 Diagrama esquemático del montaje

En la Figura 2-7 el interrogador SM125 de Micronoptics se conecta a una bobina de lanzamiento para llevar la señal óptica hasta la fibra que tiene los sensores FBG embebidos. También se muestra el ensamblaje del sensor FBG insertado dentro del tubo de cobre y cómo este es montado sobre el conductor.

Los sensores se fijaron a la línea con la ayuda de amarres plásticos, así como se muestra en la Figura 2-8.



Figura 2-8 Imagen de la fijación de un sensor FBG sobre la línea.

El sensor FBG1 y la línea por otra parte, fueron recubiertos con una capa de vinilo de poco espesor para ver los efectos del aislamiento térmico en los sensores. En la Figura 2-9 se muestra el sensor FBG1 aislado.



Figura 2-9 Imagen de la fijación y recubrimiento del sensor FBG1

Además, fue necesario fijar las secciones de fibra, intermedias usando también amarres espaciados regularmente, debido a que existía un riesgo de que la fibra se rompiera debido a la acción del viento sobre la fibra. Estos amarres, a diferencia de los que sostienen los sensores, no están fuertemente apretados. La disposición de los amarres (y uno de los sensores FBG) puede apreciarse en la Figura 2-10.



Figura 2-10 Imagen de la fijación de la fibra con amarres a separaciones regulares

2.3.2 Resultados y análisis de resultados

El experimento fue desarrollado en 3 etapas; la primera etapa que duró 20 minutos, consistió en medir la temperatura sin energizar la línea. La segunda etapa que duró alrededor de 40 minutos, se energizó la línea y se hizo un paso de corriente de 0 a 42 amperios. Luego en la tercera etapa, se incrementó la corriente de 42 a 73 y, por último, se retiró la energía durante 20 minutos.

Los resultados del experimento explicado anteriormente se pueden observar en la Figura 2-11.

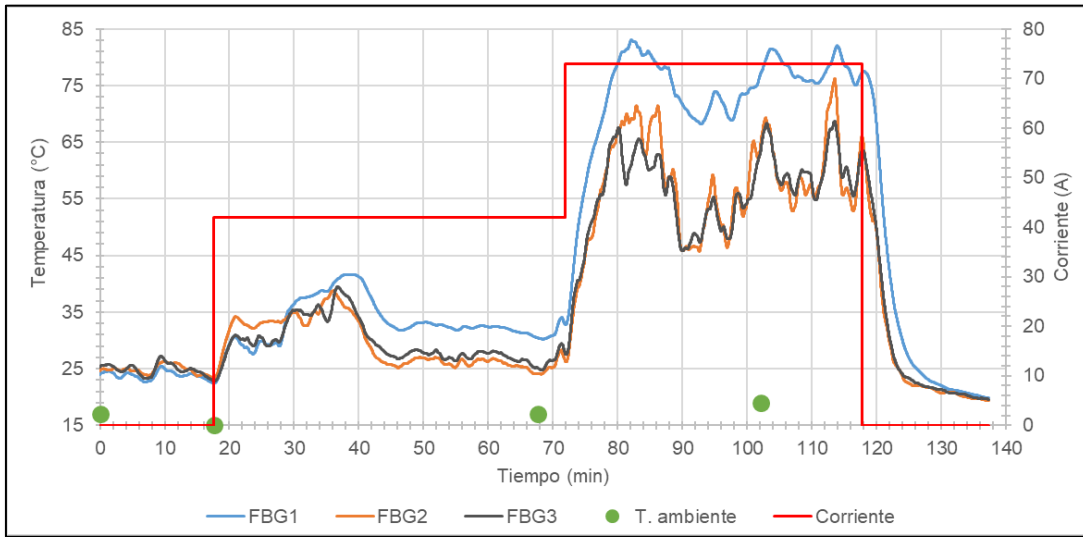


Figura 2-11 Resultados de las mediciones del primer experimento

En esta figura se tienen las mediciones de temperatura de los sensores FBG1 en azul, FBG2 en naranja, FBG3 en gris oscuro y mediciones de temperatura esporádicas como puntos verdes, en el eje vertical izquierdo, en el eje vertical derecho, está la corriente aplicada a la línea en amperios. En el eje horizontal se tiene el tiempo transcurrido en minutos.

En total el experimento duró 140 minutos (2 horas 20 minutos) en donde se recogen datos de los 3 sensores, a los cuales se les aplica un promedio móvil de 60 muestras (1 minuto), se puede ver que la temperatura medida por los sensores incrementa a medida que se incrementa la corriente y se produce el efecto Joule. También se pueden observar variaciones rápidas de la temperatura causadas principalmente por acción del viento, dado que la temperatura ambiente no varía de manera significativa.

En algunos puntos de la gráfica, la temperatura medida por dos de los sensores supera los 75 °C excediendo la temperatura máxima del conductor y empezando a generar un deterioro en la línea aún sin exceder el límite de corriente del conductor que está diseñado para transportar hasta 85 Amperios a 75 °C, con sol y sin viento, la duración y magnitud de tales sobrepasos, se pueden utilizar para efectos de mantenimiento de líneas aéreas de transmisión de energía.

En la Tabla 2-2 se resumen las temperaturas máximas, mínimas y variaciones de los 3 sensores:

Tabla 2-2 Valores máximos, mínimos y variaciones de temperatura registradas

		Primera etapa	Segunda etapa	Tercera etapa	Cuarta etapa
Corriente (A)		0	42	73	0
Temperatura máxima (°C)	FBG1	27	42	83	77
	FBG2	27	39	76	66
	FBG3	27	39	68	63
Temperatura mínima (°C)	FBG1	22	27	68	20
	FBG2	22	24	46	19
	FBG3	22	24	46	20
Variación de temperatura (°C)	FBG1	5	15	15	57
	FBG2	5	15	30	47
	FBG3	5	15	22	43

En la tabla se observa que para las etapas 1 y 2, las variaciones en las mediciones son iguales para los 3 sensores. En la etapa 3, las variaciones de temperatura aumentan, especialmente para los sensores sin aislamiento térmico.

En este experimento, se observan variaciones de temperatura importantes, que pueden ser ocasionadas por los factores medioambientales adicionales a la temperatura ambiente, y también pudieron deberse al nivel de transferencia de calor entre el conductor y el sensor FBG.

2.4 Segundo experimento

Dados los resultados del primer experimento, se decide cambiar el método de adhesión de los sensores a la línea, para mejorar la transferencia de calor entre la línea y los sensores. También deciden tomarse mediciones de parámetros ambientales adicionales como la velocidad del viento, presencia de lluvia, irradiancia solar y se toman más muestras de la temperatura ambiente y de los valores de corriente de la línea.

2.4.1 Montaje

En el montaje de este segundo experimento, se cambia la forma en que los sensores son adheridos a la línea eléctrica que, en lugar de usar sólo amarres plásticos, se recubren los sensores y la línea usando alambre de cobre AWG20 con el fin de que haya mayor transferencia de calor de la línea hacia el sensor y un mejor equilibrio térmico entre ellos.

El diagrama esquemático del montaje del segundo experimento se muestra en la Figura 2-12. En la figura se muestra la fibra óptica con los 3 sensores embebidos e insertados dentro del tubo de cobre. Los sensores son atados al conductor de la línea enrollando alambre de cobre sobre ellos. Luego dicha fibra se conecta a una bobina de lanzamiento que lleva la señal óptica al interrogador SM125 de Micronoptics y el interrogador se conecta por medio de un puerto Ethernet a un computador portátil donde se almacenan los datos capturados para posteriormente ser analizados. En la Figura 2-13 se muestra el proceso de entizado de los sensores, la primera capa (Figura 2-13 (a)) y el entizado terminado (Figura 2-13 (b))

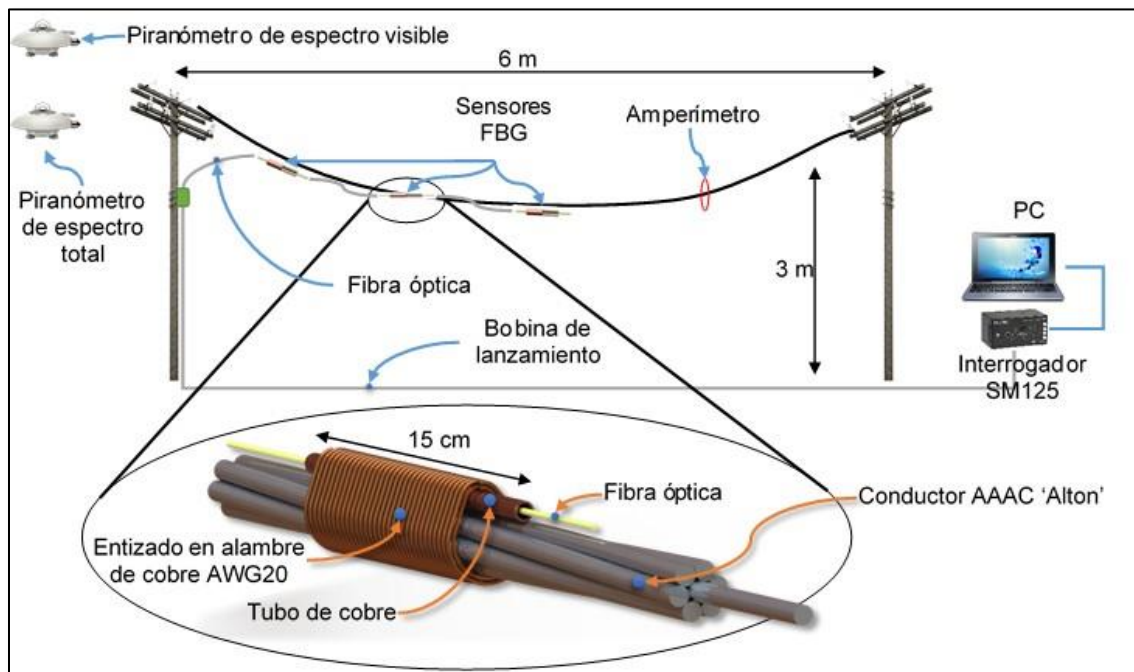


Figura 2-12 Diagrama esquemático del segundo experimento

La irradiancia solar, es medida con dos piranómetros, uno de espectro visible y otro de espectro total, ubicados en el techo del edificio aledaño al lugar donde está instalada la línea usada para el experimento. La temperatura ambiente se mide con una termocupla y un multímetro, y la velocidad del viento usando un anemómetro de filamento caliente.

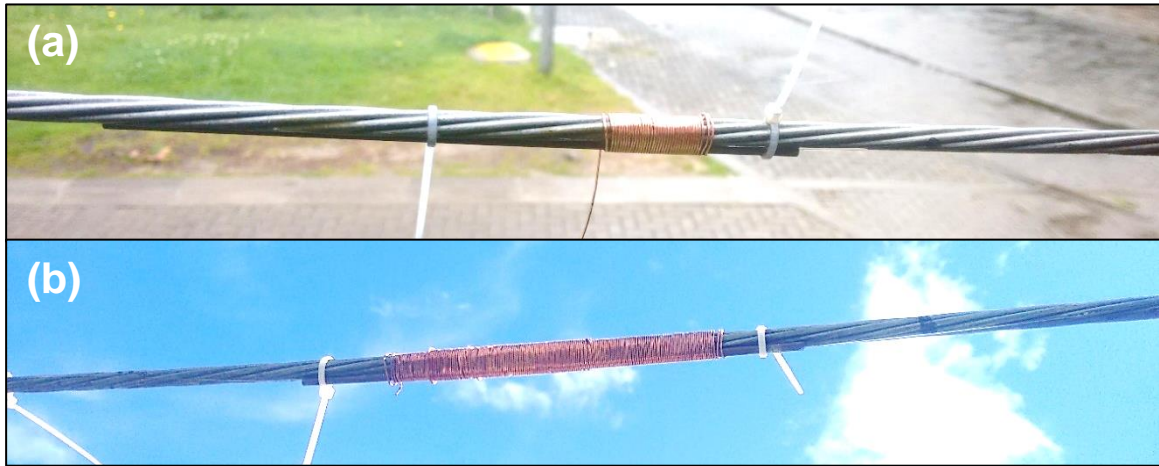


Figura 2-13 Imagen del proceso de entizado de los sensores (a) primera capa, (b) Entizado completo

2.4.2 Resultados y análisis de resultados

El experimento se llevó a cabo en 4 fases. En la primera fase, de 50 minutos de duración, el sistema inicia a tomar mediciones de temperatura de la línea sin energizar, en la segunda etapa se aumenta la corriente a 70 amperios y se mantiene en este valor durante otros 50 minutos donde se baja la corriente a 43 amperios, se mantiene por un periodo de 50 minutos y por último por 40 minutos, se deja la línea sin energía.

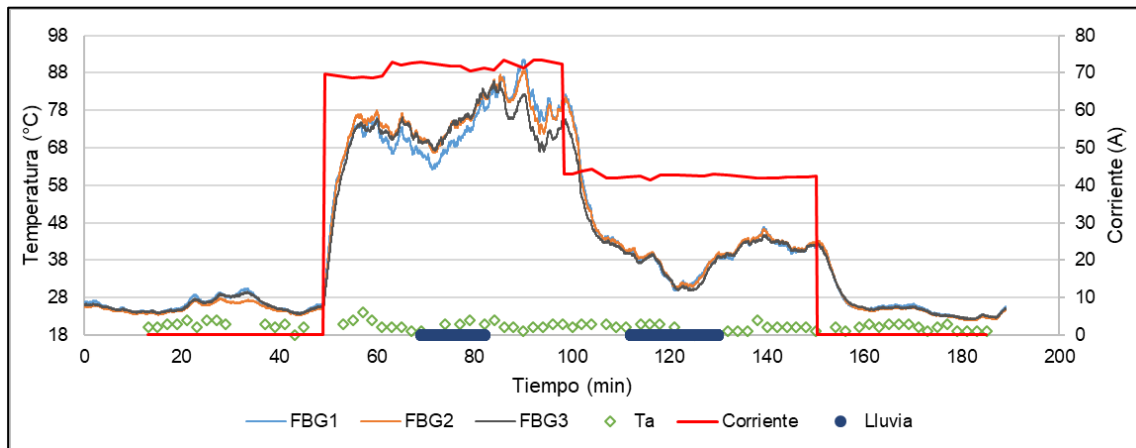


Figura 2-14 Gráfico de los resultados del segundo experimento donde se muestra la corriente de línea, temperatura ambiente y temperatura de los sensores FBG

La Figura 2-14 muestra los resultados de las mediciones de la temperatura de los sensores FBG, la temperatura ambiente y la corriente de línea. En esta figura, el eje vertical izquierdo

representa la temperatura de los sensores FBG1 en azul, FBG2 en naranja y FBG3 en gris oscuro y la temperatura ambiente en verde, todas las temperaturas medidas en °C. La corriente de línea medida en amperios, se grafica en el eje vertical derecho y en el eje horizontal se tiene el tiempo transcurrido en minutos. Adicionalmente, el eje horizontal muestra los periodos de lluvia presentes en el experimento como líneas gruesas de color azul sobre el eje.

Por otra parte, la Figura 2-15 muestra la temperatura de los sensores FBG y la temperatura ambiente, graficados ambos en el eje vertical izquierdo, y la irradiancia solar en W/m^2 medida por los piranómetros Pir1 en verde continuo y Pir2 en morado, ambos en el eje vertical derecho. Al igual que la Figura 2-14, en el eje horizontal se tiene el tiempo transcurrido, en minutos, y la presencia de lluvia marcada sobre el mismo eje como segmentos de línea azul.

En la Figura 2-14 se ve como, durante la primera fase, la temperatura de los 3 sensores es prácticamente la misma y se mantiene estable, con ligeras variaciones entre los minutos 20 a 40 que coinciden con un incremento de la irradiancia solar (ver Figura 2-15). Luego, al minuto 50, cuando se hace pasar un paso de corriente de 70 amperios por la línea, la temperatura de los 3 sensores empieza a aumentar debido al calentamiento de la línea producido por efecto Joule, llegando inicialmente hasta los 73 °C, alcanzando un valor máximo de 88 °C a pesar de mantener un valor de corriente aproximadamente constante. Al minuto 69 la temperatura de la línea empieza a disminuir debido al efecto refrigerante de la lluvia presente en ese momento, logrando una disminución de 5 °C.

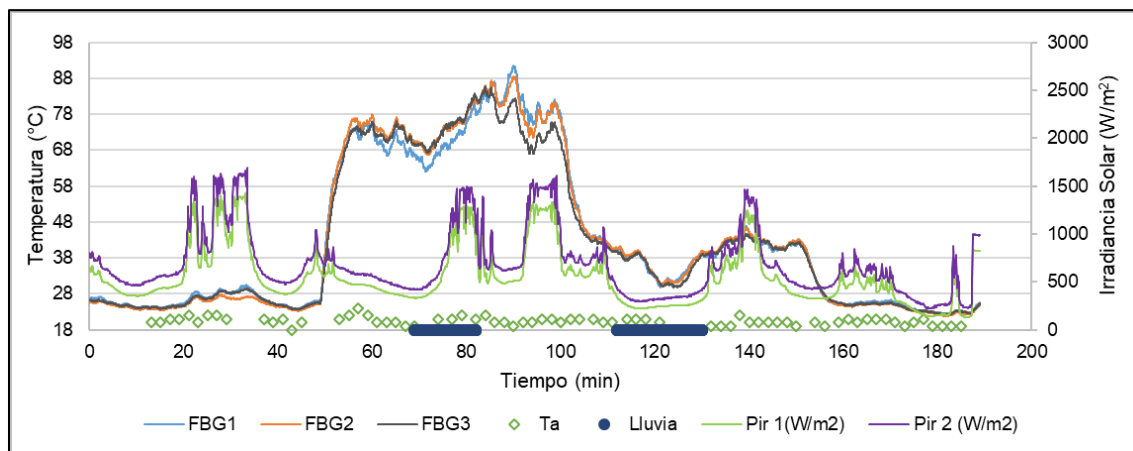


Figura 2-15 Gráfico de los resultados del segundo experimento donde se muestra la temperatura de los sensores FBG, temperatura ambiente e irradiancia solar

Al minuto 100, la corriente de la línea se disminuye a 43 amperios y la línea empieza a bajar su temperatura hasta alcanzar, momentáneamente, los 43 °C. En el minuto 112, vuelve a presentarse lluvia en el lugar, esta vez de mayor intensidad y con una irradiancia solar menor a la presentada en el minuto 69, lo que causa que la temperatura de la línea disminuya aún más llegando a decrementarse hasta en 13 °C, a pesar de tener una corriente de línea constante.

En el minuto 130, la lluvia cesa completamente y la irradiancia solar aumenta causando que la temperatura de la línea aumente hasta alcanzar su máximo local de 44 °C que coincide con un aumento fuerte en la irradiancia solar medida por los piranómetros, en el minuto 140.

En el minuto 150, se quita la corriente de la línea hasta el final del experimento. Aquí se observa como desciende la temperatura de la línea y se estabiliza alrededor de los 24 °C. En la Figura 2-16 se muestran las mediciones de la velocidad del viento hechas usando el anemómetro de filamento caliente. En el eje vertical izquierdo se grafican las temperaturas medidas por los 3 sensores FBG y la temperatura ambiente, todas en °C, en el eje vertical derecho, se grafica la velocidad del viento en m/s y en el eje horizontal se tiene el tiempo del experimento en minutos junto con la presencia de lluvia indicada por trazos gruesos azules sobre el eje.

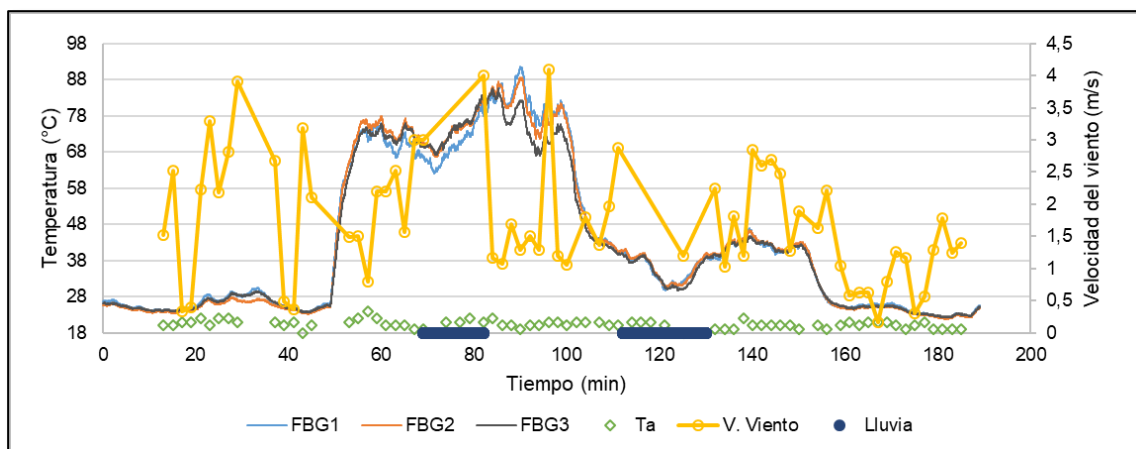


Figura 2-16 Gráfico de los resultados del segundo experimento donde se muestran la temperatura de los sensores FBG, temperatura ambiente y velocidad del viento

De la Figura 2-16 se puede observar que la velocidad del viento varía de manera abrupta a lo largo de todo el experimento, pero sin llegar a valores altos, ya que la velocidad

máxima registrada fue de 4 m/s y no se ven variaciones de la temperatura que coincidan con las variaciones de la velocidad del viento, por lo que se concluye que, en este caso el viento no tiene una mayor influencia en la temperatura de la línea. Por otra parte, debido a que la temperatura ambiente no tuvo variaciones significativas durante todo el experimento, no se puede ver el efecto de esta variable sobre la temperatura de la línea.

2.5 Conclusiones

- Los sensores FBG de tipo I, pueden usarse en redes de transmisión colombianas dado que tales redes funcionan a temperaturas de 90°C en condiciones de emergencia, y este tipo de sensores puede trabajar a temperaturas mayores.
- Los sensores introducidos dentro del tubo de cobre tienen un tiempo de respuesta 6 veces menor al tiempo de respuesta de un cable típico de una línea de transmisión.
- La transmisión de calor puede mejorarse al entizar los sensores y el conductor de la línea de transmisión.
- A partir de los datos obtenidos en el segundo experimento, se observa que la lluvia y la irradiancia solar influyen en temperatura de la línea de transmisión en comparación con la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

3. Diseño de un sistema de medición de temperatura

Para el diseño de un sistema de medición de temperatura en redes de transmisión, se tomará como ejemplo la línea Aranjuez-Usaquén (AJ-US) de la red de 115 kV propiedad de CODENSA S.A. E.S.P. Ésta línea tiene una longitud de 5432 m y vanos con una longitud media de 98,76 m [15]. Esto nos dice que la línea AJ-US tiene alrededor de 55 vanos para ser monitoreados.

3.1 Requerimientos del sistema

Tomando en cuenta las características de las redes de transmisión eléctrica tenidas en cuenta para la selección de los sensores (Sección 2.1), los datos de la línea AJ-US y tomando un punto de temperatura por vano, se tienen los siguientes requerimientos:

- Temperatura máxima: 90 °C
- Número de sensores: 55
- Voltaje de operación: 115 kV
- Distancia máxima: 5432 m

3.2 Estructura del sistema

Los componentes principales del sistema de medición propuesto son:

- Interrogador óptico
- Aislador compuesto para fibra óptica
- Conectores
- Fibra óptica entre sensores
- Sensores FBG

Los componentes mencionados anteriormente irían conectados según como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 3-1.

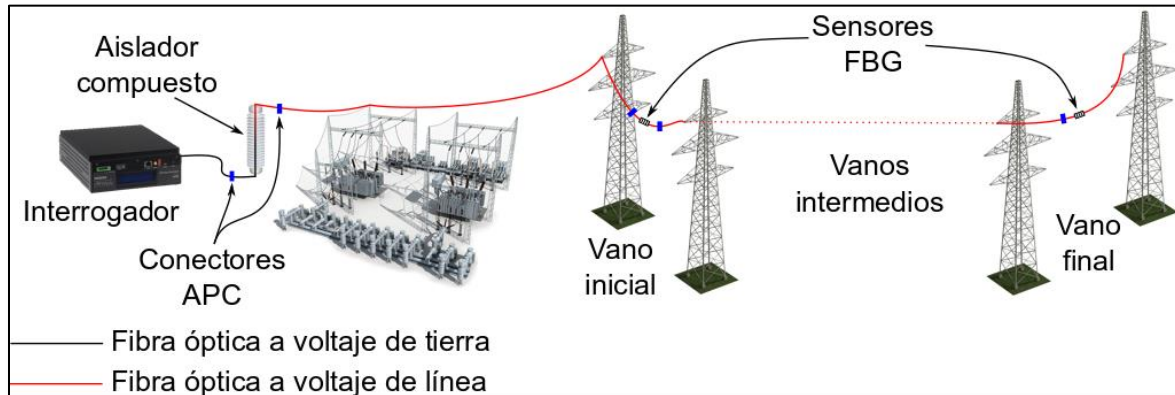


Figura 3-1 Diagrama esquemático del sistema de medición de temperatura

El funcionamiento del sistema es de la siguiente manera:

El interrogador óptico envía un haz de luz a la fibra óptica que está a potencial de tierra y esta fibra a su vez llevará el haz a un segmento de fibra que pasará por dentro de un aislador compuesto tipo poste, pasando de potencial de tierra a voltaje de línea.

De ahí, el haz luminoso viajará por la fibra óptica a voltaje de línea hasta los diferentes sensores FBG, los cuales reflejarán un haz de luz con la información de temperatura medida por éstos, haciendo el viaje de vuelta hasta el interrogador.

Finalmente, el interrogador medirá la información de temperatura codificada en las longitudes de onda reflejadas por cada sensor y entregará estos valores al sistema de gestión y monitoreo de la red para ser usada como información en la toma de decisiones.

3.3 Selección de la topología de la red de sensores FBG y cálculo del rango del interrogador

En la sección 2.1, uno de los sensores seleccionados para las pruebas fue el sensor os1200 de Micron Optics [61] dado su rango de temperatura y su compatibilidad con el interrogador sm125 del mismo fabricante. Dicho sensor tiene las siguientes características ópticas:

- Reflectividad pico: >70%
- Aislamiento: >15 dB en 0.4 nm alrededor de la longitud de onda central
- Respuesta térmica: ~9.9 pm/°C
- Rango de temperatura: -40 °C a 120°C
- Rango de temperatura del sistema: 0 °C – 110 °C

Teniendo en cuenta estas características, se plantea usar una multiplexación de los sensores por división de longitud de onda (WDM), explicada en el capítulo 1.4.1, esto debido principalmente a que es un esquema de multiplexación en el que se puede disponer de un amplio margen de potencia para cada sensor a diferencia de la multiplexación TDM en la que parte de la potencia de una longitud de onda particular, debe seguir para alimentar a los demás sensores y a medida que pasa de sensor en sensor, se va disponiendo de menor potencia para el sensor FBG.

Usando el esquema de multiplexación WDM, y conociendo el rango de temperatura del sistema de medición, se puede calcular el espectro que necesita el interrogador para poder obtener las mediciones de todos los sensores del sistema:

Cada sensor necesita para su funcionamiento, en longitud de onda:

$$\Delta\lambda_S = \Delta\lambda_A + S * \Delta T_S \quad (3.1)$$

Donde:

- $\Delta\lambda_S$ es el cambio en la longitud de onda del sensor en nanómetros
- $\Delta\lambda_A$ es el cambio en la longitud de onda del sensor para tener un aislamiento mayor a 15 dB, para este caso 0,4 nm
- S es la sensibilidad en nm/°C de los sensores a la temperatura, 9,9 pm/°C = 9,9
- ΔT_S es el rango de temperatura del sistema en °C, en este caso 110 °C

Así, reemplazando los datos en la ecuación (3.1) se tiene:

$$\Delta\lambda_S = 0,4nm + 9,9 * 10^{-3} nm/^{\circ}C * 110^{\circ}C = 1,489nm \quad (3.2)$$

Cada sensor requiere de aproximadamente 1,489 nm para funcionar en todo el rango de temperatura del sistema, sin solaparse con un sensor adyacente. Por lo tanto, para los 55 sensores del sistema de medición de temperatura se necesitarían:

$$\Delta\lambda_{ST} = 1,489nm * 55 = 81,895nm \quad (3.3)$$

Que corresponde al rango de longitudes de onda que debe poder escanear el interrogador del sistema de medición de temperatura.

3.4 Cálculo del presupuesto de potencia del sistema

Viendo la estructura del sistema planteado en la Figura 3-1, se debe hacer cálculo del margen de potencia que debe tener el interrogador para poder recolectar la información de todos los sensores de la red. Para esto se simplifica el esquema y se deja de la siguiente manera:

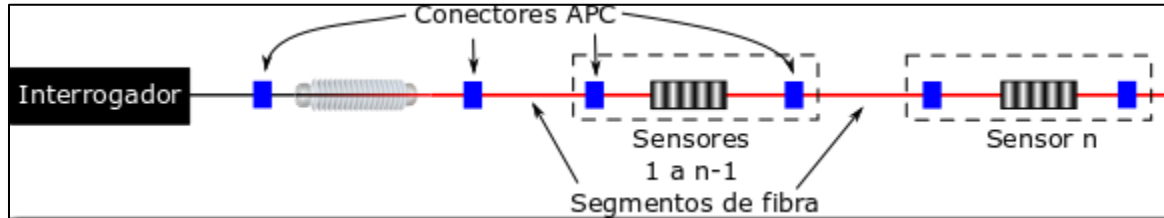


Figura 3-2 Diagrama esquemático simplificado del sistema de medición de temperatura

Teniendo en cuenta que cada sensor tiene su propio segmento en el rango de longitudes de onda y que no debe haber solapamiento espectral entre sensores, se puede simplificar la Figura 3-2 y tomar el sensor que tiene más pérdidas, es decir el último sensor del sistema (Figura 3-3).

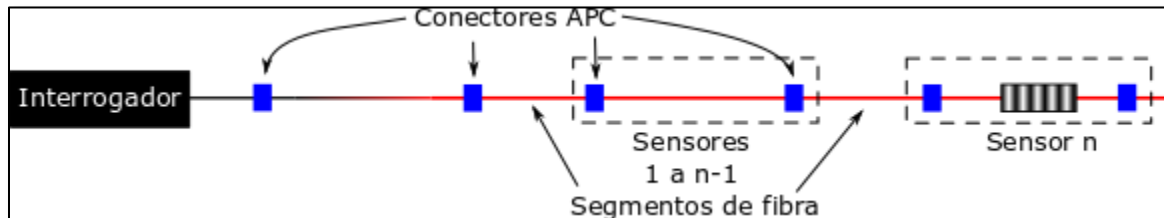


Figura 3-3 Diagrama esquemático simplificado para el último sensor

Se tiene entonces que las pérdidas de potencia (L_S), en decibeles, del haz de luz en el sistema son:

$$L_S = 2 * (L_{CT} + L_{fT}) - R_{FBG} \quad (3.4)$$

Donde:

- L_{CT} son las pérdidas totales por inserción causadas por los conectores.
- L_{fT} son las pérdidas totales causadas por la atenuación de la fibra óptica usada para transportar el haz de luz entre los sensores.
- R_{FBG} es la reflectividad del sensor FBG.

- El factor 2 de la ecuación se debe a que el haz de luz debe pasar ida y vuelta por los conectores y los segmentos de fibra

$$L_{CT} = (2 * (n - 1) + 3) * L_C \quad (3.5)$$

Donde:

- L_C son las pérdidas de cada conector
- n es el número de sensores
- El factor de multiplicación 2 se debe a que cada sensor tiene 2 conectores, excepto el último, donde el haz de luz sólo pasa por el primer conector y luego es reflejado hacia el interrogador. Además, se deben tener en cuenta los dos conectores del aislador compuesto.

Por otra parte, respecto a las pérdidas causadas por la fibra se tiene que, en proporción, la longitud de los sensores es mucho menor que la longitud de los segmentos de fibra que los unen, por lo tanto, se puede aproximar la longitud de la fibra al largo total de la línea de transmisión, así las pérdidas totales causadas por la fibra (L_{fT}) son:

$$L_{fT} = \alpha * d_l \quad (3.6)$$

Donde:

- α es la atenuación de la fibra óptica en dB/km
- d_l es la longitud de la línea de transmisión en kilómetros

Reemplazando las ecuaciones (3.5) y (3.6) en la ecuación (3.4) se tiene que las pérdidas del haz de luz en el sistema son:

$$L_S = 2 * ((2 * (n - 1) + 3) * L_C + \alpha * d_l) - R_{FBG} \quad (3.7)$$

Para el caso de estudio:

- $n = 55$ vanos y sensores
- $L_C = 0,2dB$ usando el conector 95-201-98-SP [63]
- $\alpha = 0,24 dB/km$ usando la fibra Clear Curve Mid temperature [64]
- $d_l = 5,43km$
- $R_{FBG} = 70\% = -1,549dB$ [61], [65]

Reemplazando los valores en la ecuación (3.7) se tiene:

$$L_S = 2 * ((2 * (55 - 1) + 3) * 0,2dB + 0,24 \text{ dB/km} * 5,43\text{km}) - (-1,549\text{dB}) \quad (3.8)$$
$$= 48,55\text{dB}$$

Las pérdidas totales del sistema son de 48,55 dB

3.5 Características del Interrogador

El interrogador óptico que se debe usar para el sistema de medición de temperatura, debe tener las siguientes características:

- Capacidad de interrogar en un espectro de mayor a 82 nm.
- Capacidad de interrogar sistemas con pérdidas mayores o iguales a 48,55dB.
- Capacidad de detectar más de 55 sensores.

3.6 Caso con componentes del mercado

En el mercado existen interrogadores ópticos como el si155 de Micron Optics [66]. Dicho interrogador tiene las siguientes características:

- Rango de longitudes de onda: 1460 nm a 1620 nm, es decir 160 nm
- Funciona con sistema con pérdidas de 28 dB [67]

Para el aislador compuesto para fibra óptica, se puede usar el PPC Fiber Optic Hole Post Insulator del fabricante PPC Insulators [68]. Este aislador puede llegar a niveles de aislamiento de hasta 2550 kV.

Para la fibra óptica entre sensores, se puede usar la fibra Clear Curve Mid temperatura de Corning la cual puede soportar temperaturas de hasta 180 °C [64] aunque también existen otras opciones como la Wide Temperature AllWave® FLEX Zero Water Peak (ZWP) Single-Mode Fiber dew OFS [69] que soportan temperaturas de hasta 275 °C.

Para los sensores, se pueden usar los os1100 [65] u os1200 [61] de Micron Optics.

Usando los cálculos de la sección 3.3, se puede obtener un máximo teórico de sensores que podría interrogar el equipo si155 que es de 107 sensores, sin embargo, en su nota de aplicación TN1114 [67], el fabricante dice que por cada canal, el interrogador puede medir hasta 80 sensores.

Con este número de sensores, se puede usar en la línea AJ-US. Sin embargo, el interrogador admite sistemas con pérdidas de 28 dB, por lo que dados los resultados obtenidos en la sección 3.5, en este ámbito el interrogador no funcionaría.

Una forma de solventar esto, es disminuir el número de conectores de los sensores, por ejemplo, agrupando sensores de vanos adyacentes, lo que disminuye el número total de conectores y con ello sus pérdidas.

Si en el ejemplo de la sección 3.4, se agruparan 2 vanos adyacentes, se tendrían en total no 111 conectores, sino 57, por lo cual las pérdidas totales por inserción serían:

$$L_{CT} = (57) * 0,2dB = 11,4dB \quad (3.9)$$

Y sumado a las pérdidas de la fibra que son:

$$L_{fT} = \alpha * d_l = 0,24 dB/km * 5,43km = 1,303dB \quad (3.10)$$

Darían unas pérdidas totales de:

$$\begin{aligned} L_S &= 2 * (L_{CT} + L_{fT}) - R_{FBG} = 2 * (11,4dB + 1,303dB) - (-1,549dB) \\ &= 26,95dB \end{aligned} \quad (3.11)$$

Con lo cual el interrogador si155 podría ser usado en el sistema de medición de temperatura, con un adicional de 1dB, que se puede usar para un adicional de fibra óptica de alrededor de 4 km.

3.6.2 Costos y comparativa con otros sistemas de medición del mercado

Los componentes usados en el diseño del sistema de medición de temperatura tienen precios en el mercado de:

Tabla 3-1 Tabla de costos del sistema de medición de temperatura diseñado

Componente	Precio unit. (USD)	Cantidad	Total (USD)
Sensor FBG	27,6	55	1.518
Interrogador	10.000	1	10.000
Fibra óptica	100	5,5 km	550
Aislador compuesto	100	1	100
Total			12.168

En sólo componentes, el sistema podría costar USD\$ 12.168 o más.

Por otro lado, está la solución de monitoreo de OTLM que consiste en sensores que se conectan en la línea de transmisión y transmiten los datos usando la red celular, Wifi o LoRa.

Tabla 3-2 Tabla de costos del sistema OTLM para monitoreo de líneas aéreas

Componente	Precio unit. (USD)	Cantidad	Total (USD)
Sensor OTLM	20.000	55	1'100.000
Software de análisis	6.000	1	6.000
Total			1'106.000

Al comparara el costo total de los dos sistemas, se puede ver que un sistema de medición de temperatura usando sensores FBG vale aproximadamente 10 veces menos que un sistema del fabricante OTLM. Sin embargo, el sistema OTLM, además de medir temperatura, obtiene muchas otras variables tales como voltaje, corriente, vibraciones, inclinación, entre otras, demás, el software de análisis permite medir y predecir la ampacidad de la red [70].

3.7 Conclusiones

- Las mayores pérdidas de potencia óptica de un sistema de medición de temperatura usando sensores FBG se deben a los conectores. Para disminuir estas pérdidas de potencia, se pueden agrupar vanos adyacentes colocando una fibra con varios sensores embebidos, de tal manera que cada sensor quede posicionado en el vano correspondiente.
- La topología de la red de sensores en serie con multiplexación por división de longitud de onda (WDM), permite un cálculo más sencillo de las pérdidas del sistema dado que al no solaparse espectralmente, un sensor particular no influye en los cálculos de potencia de los otros sensores de la red, por lo que se puede calcular las pérdidas de potencia para el peor caso, el último sensor de la red.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Dadas las temperaturas de operación de las redes de transmisión colombianas, se pueden usar sensores FBG tipo I, que tienen un rango de temperaturas apropiado para su operación en las redes de manera continua sin sufrir un efecto de “borrado” causado por altas temperaturas, además dado que no requieren un método de fabricación especial, este tipo de sensores FBG son de los más económicos en el mercado.
- Al contrastar los datos de los cambios de temperatura medidos en el primer experimento con los del segundo experimento en el diseño del prototipo del sistema de medición de temperatura, se determinó que es necesario entizar los sensores para que haya una mejor transferencia de calor entre la línea y el sensor.
- Dado que los sensores FBG son sensibles a los cambios de temperatura y tensión, se determinó que, para evitar los efectos de la tensión y deformación del sensor en las mediciones de temperatura, se deben meter los sensores en un encerramiento suelto, que en este caso es un pequeño tubo de cobre, el cuál pueda adherirse a la línea de transmisión, pueda expandirse y contraerse libremente sin que estos efectos afecten al sensor FBG.
- Incluso con una corriente de línea constante, la temperatura varía según las condiciones ambientales a las que esté sujeta, especialmente la lluvia y la radiación solar, por lo que, en momentos de baja radiación solar y lluvias, se puede aumentar la corriente de la línea sin exceder sus límites de temperatura.
- En Colombia se usa el dimensionamiento estático para calcular la capacidad de las redes de transmisión de energía y las redes operan la mayor parte del tiempo entre 45°C - 50 °C. Con el sistema de medición de temperatura diseñado, se podría implementar un dimensionamiento dinámico que incrementa la eficiencia de las redes, permite a los operadores tener una fuente de información adicional del uso real de la

red y un criterio de decisión adicional para la operación de la red en momentos de emergencia.

- El sistema de medición de temperatura diseñado es un ejemplo típico de un sistema que puede usarse para redes de interconexión entre diferentes partes de una ciudad, donde las líneas de transmisión tienen longitudes de aproximadamente 10 km o menos.
- En un sistema de medición de temperatura usando sensores FBG, la mayor parte de las pérdidas de potencia óptica se deben principalmente a los conectores presentes en el sistema. Si se colocan conectores en cada sensor, las pérdidas de potencia óptica pueden ser demasiado altas para el equipo de interrogación usado. Para reducir las pérdidas, se pueden agrupar vanos adyacentes para suprimir conectores y disminuir las pérdidas del sistema de tal modo que pueda cumplir con los requerimientos de potencia óptica del interrogador.

4.2 Recomendaciones

- Las pruebas de medición de temperatura realizadas en el segundo experimento, comprendieron varias condiciones climáticas a las que están sometidas las redes de transmisión de energía. Sin embargo, como un trabajo futuro, se puede extender el tiempo de las mediciones, para obtener datos en condiciones medioambientales más variadas, como por ejemplo en la noche, donde no hay radiación solar y la temperatura disminuye, la presencia de lluvias torrenciales, granizo o la combinación de lluvia en la noche.
- La estructura de la red de sensores FBG diseñada en esta investigación es totalmente en serie, por lo cual, si uno de los sensores falla (se rompe), los sensores siguientes dejarían de funcionar también, lo cual afecta la robustez del sistema. Por tal motivo se podría usar una estructura serie paralelo, donde existe una fibra principal de donde se derivan segmentos de fibra que llegan a los sensores. Esto hace que, si alguno de los sensores falla, sólo se vea afectado uno de los sensores y no todos los sensores siguientes. Un inconveniente con esta topología es que, al hacer una derivación, es necesario dividir la potencia que llega a los siguientes sensores o tomar una pequeña fracción de potencia de la rama principal para llevarla al sensor de la derivación, al contrario de lo que pasa en la topología usada, donde toda la potencia disponible llega a todos los sensores. Para evitar este efecto y usar esta topología de red, se propone

que en cada derivación se extraigan la porción del espectro que necesita el sensor de dicha derivación, mientras que el resto del espectro continúe su camino a los demás sensores, de modo similar a un multiplexor Add-Drop

- La precisión en la medición de temperatura del sistema planteado en la presente tesis se puede mejorar usando cableado con fibra óptica interna tal como los cables OPGW usados para la transmisión de datos en redes eléctricas. Esto con el fin de evitar los gradientes de temperatura que hay entre el núcleo del conductor y su superficie, el cual aumenta a medida que aumentan las temperaturas de operación y el diámetro del conductor.
- Usando sensores con características similares a los os1100, y el rango de longitudes de onda del interrogador si155, teóricamente se pueden interrogar hasta 107 sensores, sin que haya solapamientos en un rango de 110 °C, pero según la nota de aplicación del fabricante, NT1114, sin embargo, el sistema puede interrogar hasta 80 sensores por un solo canal, y puede tener hasta 16 canales, para un total de 1280 sensores, pero para su aplicación, es necesario agregar una línea adicional por canal.

A. Anexo: Métodos de fabricación de los sensores FBG

- **Fabricación por grabado interno**

La fabricación por grabado interno, mencionada en el capítulo 1.3, consiste en hacer pasar por la fibra una luz láser de frecuencia sencilla, cuya longitud de onda está dentro de la región fotosensible de la fibra. La luz incidente interfiere con la reflexión de Fresnel y forma una onda estacionaria de intensidad débil. Los puntos de máxima intensidad alteran el índice de refracción permanentemente, formando perturbaciones del índice con la misma periodicidad de la onda estacionaria.

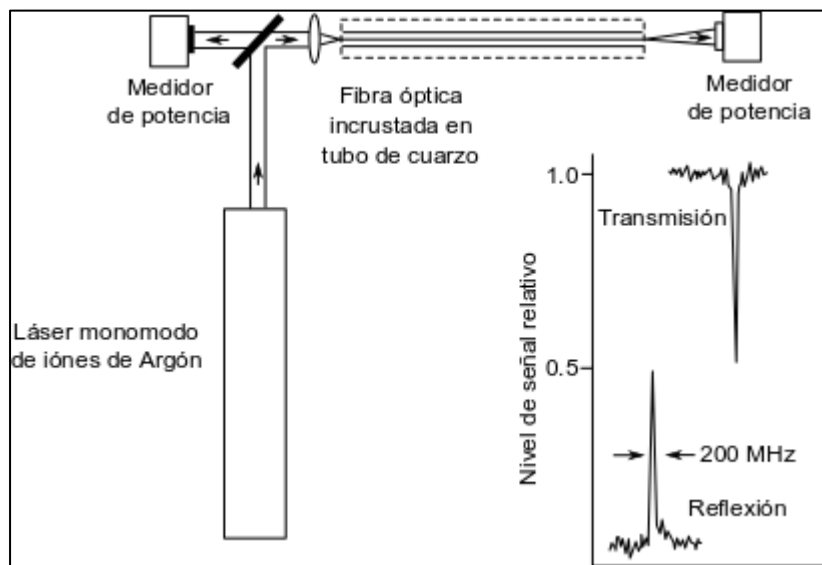


Figura 4-1 Diagrama del montaje para la fabricación de FBG por grabado interno (FBG Autoinducido) [48].

Con esto la cantidad de luz reflejada aumenta y con ello la interferencia con la luz incidente, creando una realimentación positiva y llegar hasta un nivel de saturación en el cambio del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Es la técnica más sencilla de todas, pero se requiere de longitudes largas para formar el FBG y sólo se pueden fabricar FBGs que

reflejen la misma longitud de onda con la que fueron creadas. Un montaje experimental de esta técnica se muestra en la Figura 4-1

- **Fabricación con interferómetro por división de amplitud**

Este método consiste en dividir un rayo de luz en dos rayos de igual amplitud que luego son recombinados para formar un patrón de interferencia normal al eje de la fibra (Ver Figura 4-2). La longitud de onda del FBG a fabricar puede ser variada variando el ángulo de incidencia de los haces de luz.

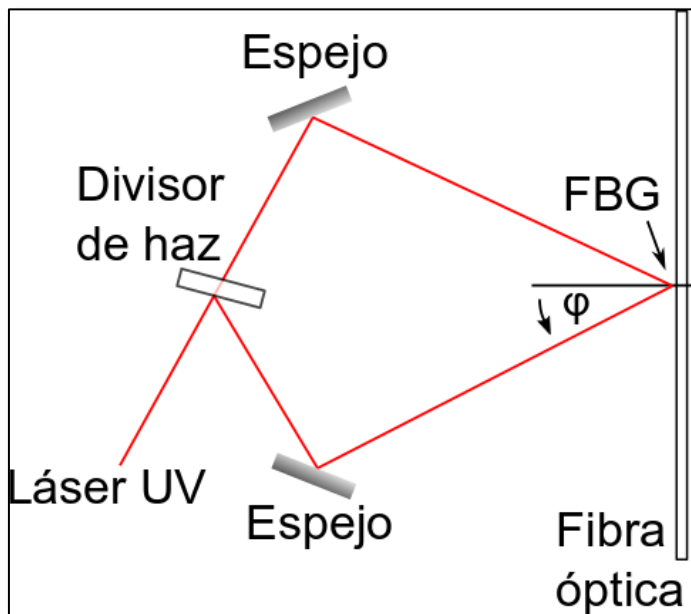


Figura 4-2 Diagrama esquemático de la técnica de fabricación por interferómetro por división de amplitud [48].

- **Fabricación con interferómetro por división de frente de onda**

En este método, un rayo de luz es espacialmente diseccionado por el borde de un prisma. Una mitad del rayo es reflejada por una de las paredes y se recombina en la cara saliente formando un patrón de franjas paralelo al núcleo fotosensible de la fibra (ver Figura 4-3(a)). Otro interferómetro por división de frente de onda es el interferómetro de Lloyd, el cual consiste en un espejo dieléctrico que redirige la mitad de un rayo a la fibra óptica que está colocada perpendicularmente al espejo tal como se muestra en la figura Figura 4-3(b).

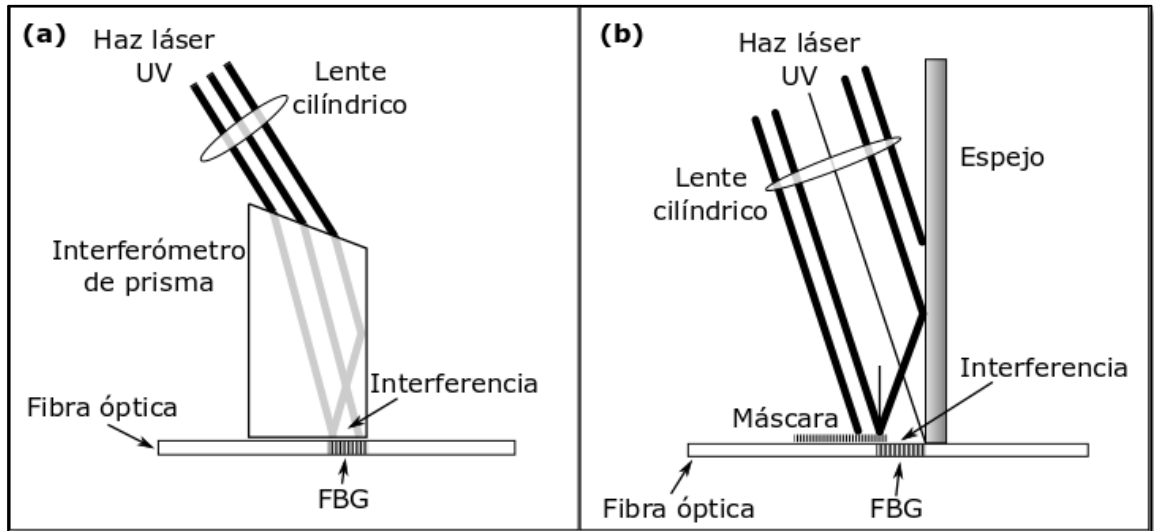


Figura 4-3 Diagrama esquemático de la técnica de fabricación por interferómetro por división de frente de onda [48].

- **Fabricación con interferómetro con fuente variable**

Este método es similar al interferómetro por división de amplitud, sólo que en este caso la longitud de onda del patrón proyectado se puede variar, ajustando la longitud de onda de la fuente en lugar de variar su ángulo de incidencia a la fibra.

- **Fabricación con máscara de fase**

La máscara de fase emplea un elemento óptico difractivo (máscara de fase) para modular espacialmente el rayo de luz UV que escribirá la fibra. Las máscaras de fase se pueden fabricar holográficamente o usando una litografía de haz de electrones. La primera opción permite fabricar máscaras con patrones complicados, pero como estas máscaras se hacen juntando varias secciones pequeñas, en el proceso se pueden generar errores mientras que el método holográfico no tiene esta desventaja. La técnica de fabricación con máscara de fase se muestra en la Figura 4-4.

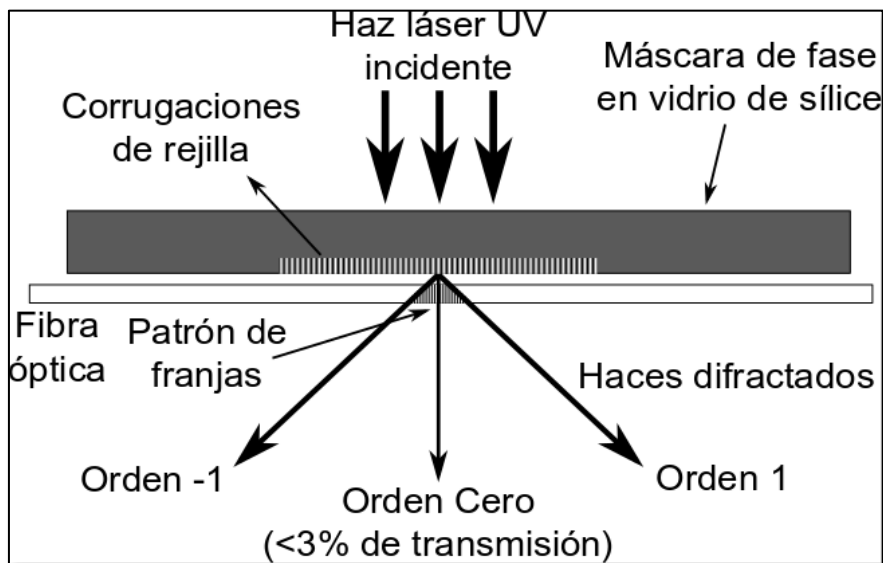


Figura 4-4 Diagrama esquemático de la técnica de fabricación con máscara de fase [48].

- **Fabricación punto a punto**

La fabricación punto a punto de FBG consiste en hacer pasar un haz de luz láser por una rendija y luego enfocar lateralmente el haz de luz mediante un lente, al núcleo de la fibra para producir el cambio en el índice de refracción y luego mover la fibra una distancia Λ y repetir el proceso por cada cambio en el índice de refracción que se requiera. Esta técnica es muy dispendiosa, requiere de mucho tiempo, además, puede haber errores debido a cambios en la temperatura y en la tensión de la fibra, por lo que se limita para sensores muy cortos.

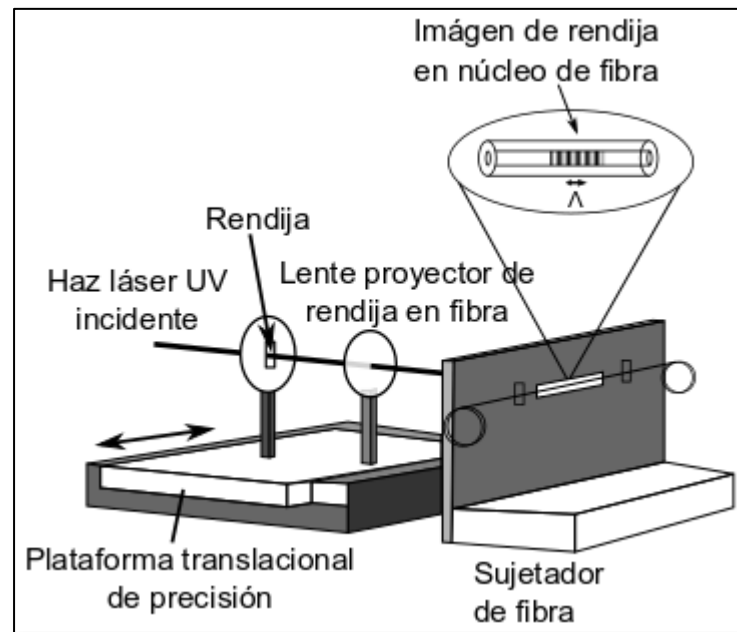


Figura 4-5 Diagrama esquemático de la fabricación de FBG por el método punto a punto [48].

- **Fabricación por proyección de máscara de fase**

Este proceso es similar al proceso de fabricación por máscara de fase, pero en este caso se usa una máscara mucho más grande. La imagen producida por la máscara es pasada por un lente de alta resolución con factor de reducción de 10:1. La imagen reducida es luego proyectada en el núcleo de la fibra, luego se usa un sistema de traslación submicrométrico controlado por computador para grabar FBG usando pulsos simples. Un diagrama esquemático del sistema se muestra en la

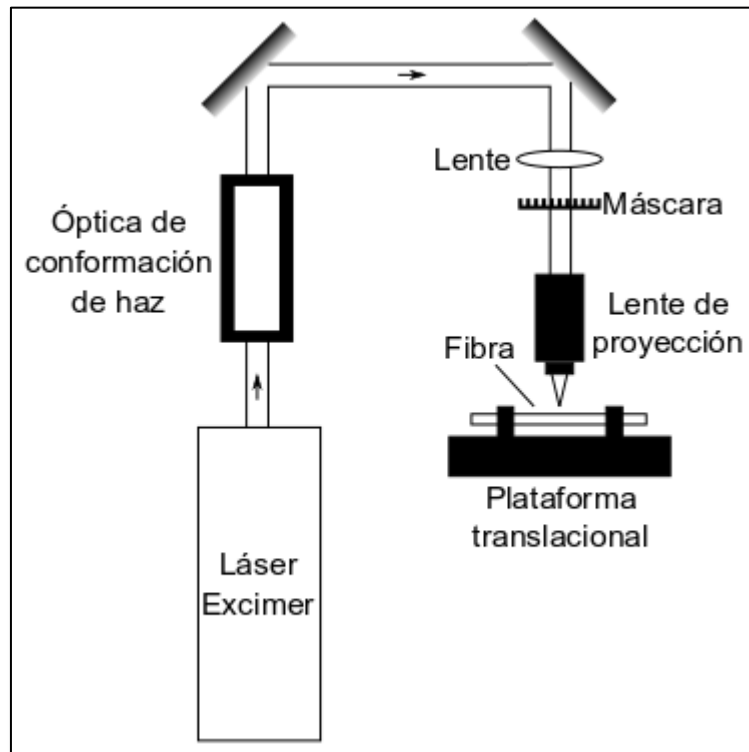


Figura 4-6 Diagrama esquemático del proceso de fabricación por proyección de máscara de fase [48].

B. Anexo: Tabla de caracterización de los sensores FBG

Temperatura (°C)	λ FBG 1 (nm)	λ FBG 2 (nm)	λ FBG 3 (nm)
25	1557,71	1562,71	1567,48
30	1557,76	1562,76	1567,53
35	1557,82	1562,81	1567,58
40	1557,87	1562,86	1567,63
45	1557,92	1562,91	1567,69
50	1557,98	1562,97	1567,74
55	1558,04	1563,02	1567,80
60	1558,09	1563,08	1567,86
65	1558,15	1563,13	1567,91

C. Anexo: Ficha técnica de sensores FBG

- **Sensor Os1100 de MicronOptics**

Fiber Bragg Grating | os1100



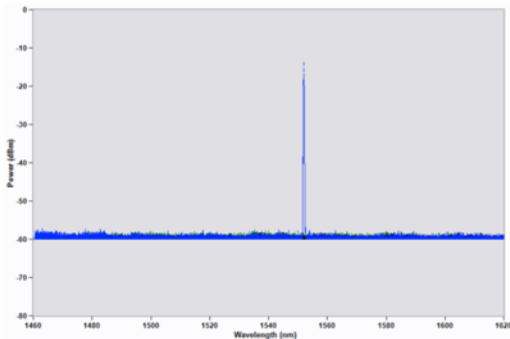
Description

The os1100 Fiber Bragg Grating (FBG) is designed for use in fiber optic sensing applications. It is a single FBG centered in a two meter length of polyimide coated optical fiber. It may be used individually or can be spliced into an array of many FBGs.

Fiber Bragg gratings are the fundamental elements upon which most fiber optic sensors are based. An FBG is an invisible reflector inside the core of the fiber that is set to a specific wavelength of light. When the fiber where the FBG is located is exposed to strain or temperature, the FBG's "center wavelength" shifts to a higher or lower wavelength. The direction and magnitude of the shift is proportional to the change in strain or temperature. os1100's are available in dozens of distinct center wavelengths. Using different wavelengths allows multiplexing of dozens of FBGs on a single fiber.

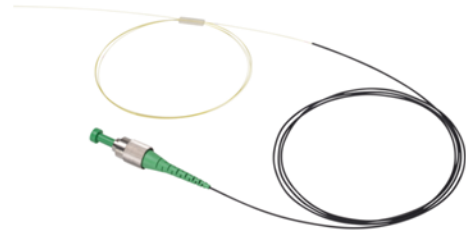
A single polyimide coated FBG

os1100's are used in applications ranging from basic experiments to construction of complex transducers containing one or more FBGs. The polyimide coating provides excellent transfer of strain through the fiber coating to the FBG in the fiber core. Polyimide also performs well over a wide temperature range. One or two FC/APC connectors, and loose buffer tube protection, are available as packaging options.



Key Features

- Optional FC/APC connector and loose buffer tube for ease of handling
- Clearly marked FBG location
- Non metallic construction



Benefits

- Longevity** – resistant to lightning, corrosion, EMI.
- Passive** – no spark hazard, no power at sensor
- Multiplexing** – many sensors, few cables, long range
- Versatility** – small size, long distances and sense many properties with one system
- Installation** – weld, glue, embed, connect in series
- Ruggedness** – fatigue over 100 million cycles, wide temperature range



70 Diseño de un sistema de medición de temperatura para líneas de transmisión y distribución de energía utilizando sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg

Fiber Bragg Grating | os1100



Physical Properties	os1100
Number of FBGs	1
FBG Length	10 mm
Strain Limit	5,000 $\mu\epsilon$
Strain Sensitivity	~ 1.2 pm/ $\mu\epsilon$
Operating Temperature Range	- 40 to 120 C
Thermal Response	~ 9.9 pm/C
Fiber Lead Length	1 m (± 10 cm), each end
Fiber Type	SMF28-Compatible
Fiber Coating	Polyimide
Fiber Re-Coating Diameter	145 - 165 μm
Buffer Tube	1 mm loose tube included with optional FC/APC connector
Fiber Bend Radius	≥ 17 mm
Optical Properties	
Peak Reflectivity (Rmax)	> 70%
FWHM (- 3 dB point)	0.25 nm ($\pm .05$ nm)
Isolation	> 15 dB ($\Phi \pm 0.4$ nm around center wavelength)

Ordering Information

os1100-www-1xx-1yy

www Wavelengths for (+/- 1nm)
Standard - 1460 to 1620 nm in 4 nm intervals

Termination type
1xx Fiber Lead 1, Length & Connector
1 Connector
xx UT Standard Lead Length, 1 m
FC Unterminated
FC/APC Connector

Termination type
1yy Fiber Lead 2, Length & Connector
1 Connector
yy UT Standard Lead Length, 1 m
FC Unterminated
FC/APC Connector

Ordering Information Example

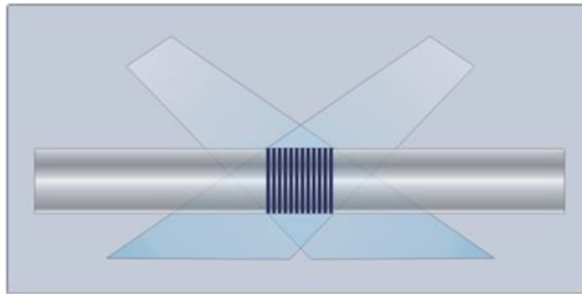
os1100-1560-1FC-1UT

• **Sensor SmartFBG de Smart Fibres**

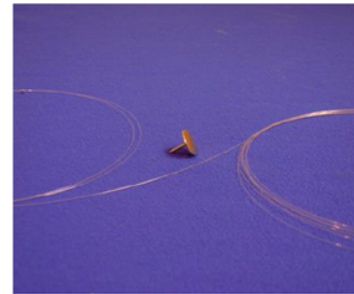


SmartFBG
Fibre Bragg Grating Sensor

- **Optical strain and/or temperature sensor**
- **Zero power, EMI immune**
- **Intrinsically safe**
- **Highly stable**
- **Multiple km signal integrity**
- **Available singly or in multiple FBG arrays**
- **Suitable for composite embedment**
- **Can be used to manufacture smart sensors and transducers**
- **Suitable for long-term SHM**



FBG recorded by interfering UV laser beams



FBG sensor in acrylate coated fibre

A Fibre Bragg Grating (FBG) is a novel optical sensor recorded within the core of a standard optical fibre. It reflects a narrow bandwidth of light, which responds faithfully to changes in temperature and strain. Many FBG sensors can be recorded onto a single optical fibre and interrogated simultaneously with a single instrument - the effect is a very low cost mechanism for distributed monitoring of strain and/or temperature within large structures, particularly suited to design validation and structural health monitoring

SmartFBG Specifications (typ):

	Unit	Standard				Options
Centre wavelength	nm	1528 – 1608				Alternative wavelength range
FBG length	mm	1	2	5	10	
Peak reflectivity	%	>=50	>=50	>=70	>=80	
3 dB bandwidth	nm	<1.5	<1.2	<0.7	<0.3	
SLSR single sensor	dB	15				> 15
Strain range	µstrain	+/- 9,000				> +/- 9,000
Strain sensitivity	pm/µstrain	1.20				
Strain resolution [†]	µstrain	0.4				
Temperature sensitivity [‡]	pm/°C	11				
Temperature resolution [‡]	°C	0.05				
Fibre type		Single Mode SMF-28, 9/125 µm				
Fibre coating and FBG recoating options*		Acrylate	Polyimide			High temperature acrylate Other custom coatings
Temperature range [‡]	°C	-270 to +85		-270 to +300		
Cable and connections		To suit application				

[†] with 0.5 pm resolution interrogator

[‡] decreased temperature sensitivity below -170 °C, no temperature sensitivity below -220 °C

* Polyimide recoating recommended for strain applications

All specifications are correct at the time of writing and may change without notice.

Certain specifications may be speculative or untested - please contact us to confirm the specification meets with your requirements.

• **SmartTemp de Smart Fibres**



SmartTemp Isolated Coupon Package

Key Features

- FBG Temperature Sensors
- Zero Power, EMI Immune, Intrinsically Safe
- Broad Operating Temperature Range
- Highly Stable
- Multi-km Signal Integrity
- Numerous Package Options to Suit Applications
- Available as Multiple Sensor Arrays

About SmartTemp

Smart Fibres FBG Temperature Sensors operates by one of two methods:

- (i) Loose tube, whereby the FBG is isolated from external strain by a tubular housing and wavelength variations due to the thermo-optic coefficient of the FBG are measured.
- (ii) Isolated coupon, whereby the FBG measures the expansion of a coupon of material, isolated from external strain, and wavelength variations due to the coupon thermal expansion plus the thermo-optic coefficient of the FBG are measured.

The loose tube construction benefits from smaller sensor packaging and greater installation flexibility. The isolated coupon construction benefits from greater measurement sensitivity. For a truly, miniature temperature sensor, for example to embed within a composite, a terminal FBG can be housed within a polyimide capillary of typ. 400 µm diameter.

FBG temperature sensors are also available in our SmartPatch, SmartFBG and SmartWeld constructions.

Specifications

Parameter	Loose Tube	Isolated Coupon	
		Steel	Aluminium
Sensor Construction	Steel or polymer tubing with sensing fibre loose inside	Metallic housing with sensing fibre bonded to metallic coupon inside	
Temperature Sensitivity (typ.) [†]	11 pm/°C	11 plus 1.2'coupon CTE	
		= -24	= -40
Measurement Resolution (typ.) [†]	0.05 °C	0.02 °C	0.01 °C
Measurement Accuracy (typ.) [†] <small>(with Perfect Calibration)</small>	0.1 °C	0.04 °C	0.025 °C
Measurement Range [‡]	-220 to +150 °C		



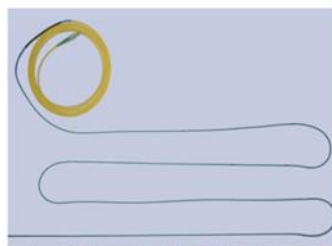
Fibre Type	Single Mode SMF-28, 9/125 μm	
Typical FBG Type ¹	CWL 1510 to 1590 nm, FWHM <- 0.7 nm, R > 70 %, Apodised profile, SLSR > 15dB	
Sensor Dimensions (typ.)	Tubing 2 to 4 mm OD Length to suit application	Housing 8'8'60 mm Cable 2 to 4 mm OD
Cable and Connections	To suit application	

¹Alternative CWL or spectral profile on request

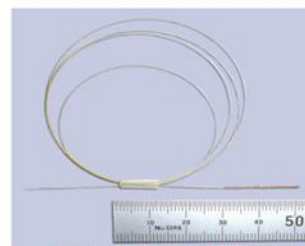
²With 0.5 pm resolution / 1 pm accuracy interrogator. In practice accuracy may be limited by reference measurement

³Decreased temperature sensitivity below -170 °C

Specifications may change without notice



Loose Tube Multi-Point Temperature Sensing Array



Composite Embedment Package

D. Anexo: Publicaciones

En el desarrollo del presente trabajo investigativo, se hicieron las siguientes publicaciones:

- Artículo indexado en la base de datos de la IEEE, disponible en línea bajo el título: Temperature measurements on overhead lines using Fiber Bragg Grating sensors. Resultado de una ponencia en el 2017 IEEE international Instrumentation and Measurement Technology Conference, evento desarrollado en Turín, Italia.
- Artículo indexado en la base de datos de la IEEE, disponible en línea bajo el título: Optical sensing using fiber bragg gratings: fundamentals and applications. Publicado en el IEEE Instrumentation & Measurement Magazine vol. 20, pags. 33–38.
- Artículo presentado al evento “International Conference on Optical Fiber Sensors OFS2020”, bajo el título Measuring overhead line temperature using fiber Bragg grating sensors. Pendiente de aprobación.

Bibliografía

- [1] J. Rosero and J. Chinchilla-Guarin, "Impact of Including Dynamic Line Rating Model on Colombian Power System," *4th Int. Conf. Smart Energy Grid Eng.*, pp. 36–40, 2016.
- [2] D. Balango, B. Nemeth, and G. Gocsei, "Predicting conductor sag of power lines in a new model of dynamic line rating," *33rd Electr. Insul. Conf. EIC 2015*, no. June, pp. 41–44, 2015.
- [3] S. C. E. Jupe, D. Kadar, G. Murphy, M. G. Bartlett, and K. T. Jackson, "Application of a dynamic thermal rating system to a 132kV distribution network," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–8, 2011.
- [4] M. Musavi, D. Chamberlain, and Q. Li, "Overhead conductor dynamic thermal rating measurement and prediction," *SMFG 2011 - IEEE Int. Conf. Smart Meas. Grids, Proc.*, no. 1, pp. 135–138, 2011.
- [5] D. J. Spoor and J. P. Roberts, "Development and Experimental Validation of a Weather-Based Dynamic Line Rating System," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol.*, 2011.
- [6] L. Bjerkan, "Application of fiber-optic bragg grating sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines.," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 4, pp. 554–560, 2000.
- [7] Q. Li, M. Musavi, and D. Chamberlain, "Overhead conductor thermal rating using neural networks," *SMFG 2011 - IEEE Int. Conf. Smart Meas. Grids, Proc.*, pp. 139–142, 2011.
- [8] M. Ntuli, R. Xezile, N. Mbuli, J. H. C. Pretorius, and L. Motsoeneng, "Increasing the capacity of transmission lines via current uprating: An updated review of benefits, considerations and developments," *Proc. 2016 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [9] A. H. Wijethunga, J. V. Wijayakulasooriya, J. B. Ekanayake, and N. De Silva,

- “Conductor temperature based low cost solution for dynamic line rating calculation of power distribution lines,” *2015 IEEE 10th Int. Conf. Ind. Inf. Syst. ICIIIS 2015 - Conf. Proc.*, pp. 128–133, 2016.
- [10] I. Albizu, E. Fernández, A. J. Mazón, and J. Bengoechea, “Influence of the conductor temperature error on the overhead line ampacity monitoring systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 4, p. 440, 2011.
- [11] L. C. Cradden and G. P. Harrison, “Adapting overhead lines to climate change: Are dynamic ratings the answer?,” *Energy Policy*, vol. 63, pp. 197–206, 2013.
- [12] J. A. Valencia Marín, C. A. García Botero, W. A. Martínez Moreno, and R. Rodríguez Hernández, “Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia,” *UPME. SIEL*, Bogotá, p. 55, 2016.
- [13] C. Desandré, M. Mathiou, V. Bottura, M. C. Borlino, L. Cerise, and E. Imperial, “Method for monitoring the electromagnetic impacts due to high voltage overheads lines in Aosta Valley,” *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, 2012.
- [14] R. Bhattarai, A. Haddad, H. Griffiths, and N. Harid, “Voltage uprating of overhead transmission lines,” *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2010.
- [15] A. M. Mejía Solanilla, “Análisis técnico y económico de la repotenciación de líneas aéreas de alta tensión en un sistema de subtransmisión,” Universidad tecnológica de Pereira, 2008.
- [16] K. Kopsidas and S. M. Rowland, “Evaluating opportunities for increasing power capacity of existing overhead line systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2011.
- [17] B. Subba Reddy and D. Chatterjee, “Performance evaluation of high temperature high current conductors,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 3, pp. 1570–1579, 2016.
- [18] S. M. Téllez Gutiérrez, “Comportamiento de conductores eléctricos usados en líneas de transmisión ante esfuerzos electromecánicos y térmicos combinados,” Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [19] Minminas, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE 2013,” 2013.
- [20] F. Jakl and A. Jakl, “Effect of elevated temperatures on mechanical properties of overhead conductors under steady state and short-circuit conditions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 1, pp. 242–246, 2000.

-
- [21] G. D. B. Moore P J, "Remote sensing of overhead line conductor temperature using an infra-red sensor," *IEE Conf. Publ.*, vol. 2000, no. CP478, pp. 385–389, 2000.
- [22] S. Beryozkina, A. Sauhats, A. Banga, and I. Jakusevics, "Testing thermal rating methods for the overhead high voltage line," *12th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2013*, pp. 215–220, 2013.
- [23] B. S. Reddy and D. Chatterjee, "Computation of current and temperature distribution for high temperature low sag conductors," *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf. PIICON 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [24] C. Tumelo-Chakonta and K. Kopsidas, "Assessing optimal conductor utilization under N-1 overload security studies," *2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013*, pp. 1–6, 2013.
- [25] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Guide for Determining the Effects of High-Temperature Operation on Conductors, Connectors, and Accessories*, no. IEEE Std 1283™-2004. 2005.
- [26] J. R. Harvey, "Effect of elevated temperature on the strength of aluminum conductors," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 98, pp. 1769–1772, 1972.
- [27] A. N. Akpolat, S. V. Nese, and E. Dursun, "Towards to smart grid: Dynamic line rating," *Proc. - 2018 6th Int. Istanbul Smart Grids Cities Congr. Fair, ICSG 2018*, pp. 96–100, 2018.
- [28] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*. 2013.
- [29] C. R. Black and W. A. Chisholm, "Key Considerations for the Selection of Dynamic Thermal Line Rating Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 5, pp. 2154–2162, 2015.
- [30] R. G. Olsen and K. S. Edwards, "A New Method for Real-Time Monitoring of High-Voltage Transmission Line Conductor Sag," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 4, pp. 62–63, 2002.
- [31] A. K. Kazerooni, J. Mutale, M. Perry, S. Venkatesan, and D. Morrice, "Dynamic thermal rating application to facilitate wind energy integration," *2011 IEEE PES Trondheim PowerTech Power Technol. a Sustain. Soc. POWERTECH 2011*, 2011.
- [32] E. M. Carlini, S. Favuzza, S. E. Giangreco, F. Massaro, and C. Quaciari, "Uprating an overhead line. Italian TSO applications for integration of RES," *4th Int. Conf.*

-
- [44] G. Alvarez-Botero, F. E. Barón, C. C. Cano, O. Sosa, and M. Varón, "Optical sensing using fiber bragg gratings: fundamentals and applications," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, pp. 33–38, 2017.
- [45] M. Jones, "A sensitive issue," *Nat. Photonics*, vol. 2, no. March, pp. 153–155, 2008.
- [46] S. Adachi, "Distributed optical fiber sensors and their applications," *SICE Annu. Conf. 2008*, pp. 329–333, 2008.
- [47] M. Niklès and F. Ravet, "Distributed fibre sensors: Depth and sensitivity," *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 7, pp. 431–432, Jul. 2010.
- [48] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston, London: Artech House, 1999.
- [49] J. Stone, "Photorefractivity in GeO₂-doped silica fiber," *J. Appl. Phys.*, vol. 62, pp. 4371–4374, 1987.
- [50] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, 1989.
- [51] Y.-J. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 355–375, Apr. 1997.
- [52] F. E. Barón, G. Alvarez-Botero, F. Amortegui, D. Pastor, and M. Varon, "Temperature measurements on overhead lines using Fiber Bragg Grating sensors," in *2017 IEEE international Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2017*, pp. 1128–1131.
- [53] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg grating sensors for harsh environments.," *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 2, pp. 1898–918, Jan. 2012.
- [54] X. Dong, H. Zhang, B. Liu, and Y. Miao, "Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications," *Photonic Sensors*, vol. 1, no. 1, pp. 6–30, Dec. 2010.
- [55] W. Ecke, M. W. M. W. Schmitt, I. Jena, V. Paper, F. Gmbh, and C. Kg, "Fiber bragg gratings in industrial sensing," in *OSA Technical Conference OFC/NFOEC, 2013*, pp. 1–67.
- [56] X. Li and Y. Li, "High Voltage Power Line Temperature and Strain Simultaneous Measurement Research Based on FBG," *2010 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, no. 2, pp. 1–4, 2010.
- [57] T. K. Gangopadhyay, M. C. Paul, and L. Bjerkan, "Fiber-optic sensor for real-time

- performance/?wpdmdl=2562.
- [68] P. Insulators, "Fiber Optic Hole Post Insulator," *Datasheet*, 2020. [Online]. Available: https://www.ppcinsulators.com/wp-content/uploads/2018/08/PPC-Fiber-Optic-Hole-Post-Flyer_US-letter_LQ.pdf.
- [69] OFS, "Wide Temperature AllWave® FLEX Zero Water Peak (ZWP) Single-Mode Fiber." OFS, pp. 1–2, 2018.
- [70] M. Kovac, "OTLM System Line Management," 2020. [Online]. Available: <https://www.otlm.eu/energy/otlm-device/>.